

Universidad Carlos III de Madrid
Departamento de Teoría de la Señal



EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE COORDINACIÓN DE
ESTACIONES BASE EN CANALES QUE SIGUEN EL MODELO SCM

Autora: Ana Santos Rodríguez
Tutora: Ana García Armada



Agradecimientos

Aquí viene la parte que parece más sencilla de este proyecto, pero que con el temor de que se te olvide el nombre de alguien, quizás sea más complicada que cualquier capítulo del documento en el que nos encontramos.

Lo primero de todo es agradecer el esfuerzo para que este proyecto saliera adelante a Ana, mi tutora. Sus conocimientos e ilusión por lo que hace, han hecho que retome mi interés en las telecomunicaciones, últimamente algo perdido. Así que Ana, muchas gracias por todo lo que he aprendido y gracias por tu paciencia.

Aunque en esta aventura por la Carlos III, he conocido mucha gente, nombro aquí a los qué sé que después del punto y final de este proyecto, van seguidos dos puntos suspensivos.

Coleguitas de clase, Cris, Jorge, Ales, Ana, Paula, que buenos momentos hemos pasado con las interminables prácticas y preparándonos esas magnificas asignaturas. Pero mejores han sido los momentos fuera de la universidad.

Las últimas incorporaciones a esta etapa universitaria y no menos importantes, mi actual compi de piso Alia y cómo no, Mari Luz. Gracias por el apoyo, sobre todo a lo largo de este proyecto, sin esos ratos esto no hubiera sido igual. Otra nueva incorporación, Cris, compi de clase de Iria, a estas alturas parece que las compañeras fuimos nosotras.

Resaltar en mayúsculas a Ro, Iria y Aida, son las que más tiempo llevan conmigo en esta aventura y cada una sabe por qué las nombro aquí. Gracias mujercillas. Que no se me olvide nombrar a Antonio y Adal, que aunque van y vienen, se que están siempre ahí. Y a Gonzalo y Juan, que aunque son los respectivos, puedo contarlos como dos más.

Buenos recuerdos quedan también de la época pasada en TID, creo que es con quienes he compartido más momentos hablando y quejándonos de nuestros proyectos fin de carrera. Así que agradecer esos momentos a: Chauder, David, Gus, Enza y Raquel. En TID hemos pasado muy buenos años y los seguiremos recordando durante mucho tiempo, en cualquier parte del mundo ;).

Como no, tengo que hablar de mis amigos de Mérida, especialmente el nombre de Gemita y María, que durante más o menos tiempo me han tenido que aguantar hablar de temas raros. Con ellas la parte de relajación ha sido mucho más divertida de lo que cualquiera pudiera imaginar. Gracias amiguitas.

Por último y como parte primordial de estos agradecimientos, dar las gracias a mi familia. Mis padres, Mari Toni y Ramón. Son el pilar que ha sostenido mi carrera universitaria, por no exagerar diciendo el pilar de mi vida. Así que Papá y Mamá, gracias por el apoyo que me habéis dado, sé que la entrega de este proyecto os va a evitar muchas conversaciones largas y tendidas. Gracias, poco a poco os iré recompensado vuestro esfuerzo.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

Nombrar aparte a mi hermanito Alberto, no ha sufrido directamente mis agobios pero sí indirectamente. Ahora que somos mayores empezaremos a disfrutar de nuestra relación como dios manda.

Gracias a todos.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

Título:

Autor:

Director:

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día __ de _____
de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de
Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE



Índice General

Índice Figuras	7
Índice Tablas.....	9
1. Introducción	10
1.1 Comunicaciones móviles.....	10
1.1.1 Características más destacadas de LTE	12
1.2 Objetivos proyecto.....	14
1.3 Estructura de la memoria.....	16
2. Comunicaciones MIMO en entornos Multiusuario	18
2.1 Canales MIMO	21
2.1.1 Capacidad en sistemas MIMO.....	24
2.2 Canal SCM	26
2.2.1 Modelo de simulación para el SCM	26
2.2.2 Definiciones generales, parámetros y asunciones.	28
2.2.2.1 Características del Path.....	29
2.2.2.2 Modelo de correlación	30
2.2.2.3 Modelo de canal.....	32
2.2.3 Entornos utilizados	33
2.2.4 Parámetros de usuarios.	36
2.2.4.1 Generación de parámetros para entorno Macro celda.	36
2.2.4.2 Generación de parámetros para entorno Urbano Micro celda.	39
2.3 Coordinación de estaciones base.	41
3. Escenarios	44
3.1 Distribución de celdas y usuarios	44
3.2 Escenarios LTE.....	45
3.2.1 Dimensiones de las celdas.	46
3.2.2 Modelo de canal.....	48
3.3 Escenarios específicos	49
4. Comprobaciones previas	52
4.1 Influencia entre estaciones base	52
4.2 Path loss de la Matriz de canal	54
4.3 Comportamiento canal con separación de antenas en 1x1	54
5. Resultados	56
5.1 Resultados dependiendo del tamaño del escenario.....	56
5.2 Resultados dependiendo del número de elementos del array de antenas	58
5.2.1 Resultados dependiendo del número de antenas por estación base.....	58
5.3 Resultados dependiendo de la potencia	60
5.4 Resultados dependiendo de la separación de elementos del array en transmisión	63
5.4.1 Configuración 2x2 con separación antenas en transmisión.....	64
5.4.1 Configuración 4x4 con separación antenas en Transmisión	67
5.5 Resultados dependiendo de la separación de elementos del array en recepción.	70
5.5.1 Configuración 2x2 con separación antenas en recepción.....	70
5.5.1 Configuración 4x4 con separación antenas en recepción.....	72
5.6 Comparación entre diferentes canales	75
6. Conclusiones.....	80
7. Trabajos futuros	82



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

A. Pliego de condiciones	83
B. Presupuesto	84
C. Glosario de términos y acrónimos	86
Bibliografía.....	89



Índice Figuras

Figura 1.1 Evolución comunicaciones móviles	10
Figura 2.1 Evolución de la tecnología MIMO	19
Figura 2.2 Sistema MIMO	21
Figura 2.3 Esquema obtención coeficientes de canal	28
Figura 2.4 Ejemplo de retardo de potencia de un canal.....	29
Figura 2.5 PAS	30
Figura 2.6 Modelo multipath SCM.....	30
Figura 2.7 Autocorrelación frente a separación de antena	32
Figura 2.8 Modelo de canal 2x2	33
Figura 2.9 Diagrama de radiación	35
Figura 3.1 Distribución de celdas	44
Figura 4.1 Matriz generada con canales 19x19	52
Figura 4.2 Matriz generada con canales 19x19	52
Figura 4.3 Representación tasa separación antenas 1x1	54
Figura 5.1 CDF por BS para 16x16	56
Figura 5.2 CDF por BS para 36x36.....	57
Figura 5.3 CDF por BS para 64x64.....	57
Figura 5.4 CDF por BS 1x1 con diferentes algoritmos	58
Figura 5.5 CDF por BS 2x2 con diferentes algoritmos	59
Figura 5.6 CDF por BS 4x4 con diferentes algoritmos	59
Figura 5.7 Tasas convex dependiendo número de elementos array	60
Figura 5.8 CDF 2x2 para potencia 5W.....	61
Figura 5.9 CDF 2x2 para potencia 10 W	61
Figura 5.10 CDF 2x2 para potencia 15 W.....	62
Figura 5.11 Tasa algoritmo convex diferentes potencias	63
Figura 5.12 CDF $d=\lambda/4$ antenas en transmisión 2x2	64
Figura 5.13 CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 2x2.....	65
Figura 5.14 CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 2x2.....	65
Figura 5.15 CDF CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 2x2.....	65
Figura 5.16 Resultados tasas separación antenas transmisión 2x2.....	67
Figura 5.17 CDF $d=\lambda/4$ antenas en transmisión 4x4	67
Figura 5.18 CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 4x4.....	68
Figura 5.19 CDF $d=\lambda$ antenas en transmisión 4x4	68
Figura 5.20 CDF $d=2\lambda$ antenas en transmisión 4x4	68
Figura 5.21 Resultados tasas separación antenas transmisión 4x4.....	69
Figura 5.22 CDF $d=\lambda/4$ antenas en transmisión 2x2.....	70
Figura 5.23 CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 2x2.....	71
Figura 5.24 CDF $d=\lambda$ antenas en transmisión 2x2	71
Figura 5.25 CDF $d=2\lambda$ antenas en transmisión 2x2	71
Figura 5.26 Resultados tasas separación antenas recepción 2x2	72
Figura 5.27 CDF $d=\lambda/4$ antenas en transmisión 4x4.....	73
Figura 5.28 CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 4x4.....	73
Figura 5.29 CDF $d=\lambda$ antenas en transmisión 4x4	73
Figura 5.30 CDF $d=2\lambda$ antenas en transmisión 4x4	74
Figura 5.31 Resultados tasas separación antenas recepción 4x4.....	76
Figura 5.32 CDF 1x1 por antena para canal SCM	77



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

Figura 5.33 CDF 2x2 por antena para canal SCM	77
Figura 5.34 CDF 4x4 por antena para canal SCM	77
Figura 5.35 CDF por antena otro modelo de canal.....	78



Índice Tablas

Tabla 2.1 Características entornos	34
Tabla 3.1 UTRA y EUTRA casos	46
Tabla 3.2 EUTRA casos de simulación para micro-cell MIMO	46
Tabla 3.3 Parámetros para simulación de sistemas Macro-cell	47
Tabla 3.4 Parámetros para simulación de sistema Micro-cell	48
Tabla 3.5 Modelo de canal para primeras simulaciones	48
Tabla 4.1 Resultados comprobación previa separación antenas	54
Tabla 5.1 Resultados medianas de tasas para diferentes tamaños de escenarios	57
Tabla 5.2 Resultados tasas diferentes configuraciones	59
Tabla 5.3 Resultados medianas de tasas para diferentes potencias	62
Tabla 5.4 Resultados tasas diferentes separación antenas transmisión 2x2.....	66
Tabla 5.5 Resultados tasas para diferentes separaciones antenas transmisión 4x4	69
Tabla 5.6 Resultados tasas diferente separación antenas recepción 2x2	72
Tabla 5.7 Resultados tasas diferente separación antenas recepción 4x4	74
Tabla 5.8 Resultados tasas diferentes configuraciones	76
Tabla B.1 Presupuesto	85

1. Introducción

1.1 Comunicaciones móviles

La evolución social que en los últimos años se está realizando, condiciona la evolución en el mundo de las comunicaciones móviles y viceversa. Cada día tenemos mayores necesidades que mostramos a través de la dependencia de tener y disfrutar de aparatos que hace cincuenta años eran impensables que fueran a formar parte de nuestra vida cotidiana, los móviles.

Ni que decir tiene, que una vez que el mundo móvil ha despegado, cada vez se exigen más y mejores servicios. Los usuarios necesitan que la tecnología evolucione al mismo ritmo que ellos. Por ello es básico aumentar la capacidad de transmisión de estos dispositivos, ya que las futuras aplicaciones así lo requieren. De hecho, hay que destacar que incluso antes de que se implantara la ya conocida generación de móviles 3G (Third Generation), y mientras la generación 2G (Second Generation), sigue en uso, en Europa ya se estaba investigando acerca de una posible cuarta generación 4G (Four Generation), que será un gran avance en este sector.

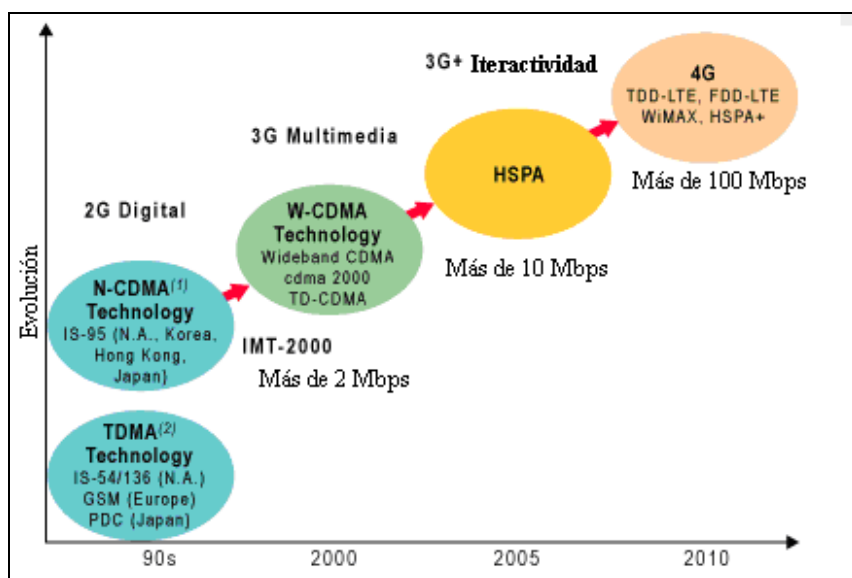


Figura 1.1 Evolución comunicaciones móviles



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

Como ya se ha advertido anteriormente, la 4G supone una gran evolución tanto en los terminales móviles como en la calidad y los servicios proporcionados. A partir de ahora, se abre un mundo de posibilidades en servicios de interactivos multimedia, pero hasta llegar aquí las comunicaciones móviles han sufrido una gran evolución a lo largo de los años. Para entender mejor a donde hemos llegado y lo que en un futuro se espera, a continuación se habla, sin entrar en mucho detalle, de dicha evolución.

El primer servicio de radiocomunicación se introdujo en EEUU en la década de 1940 y se utilizó para conectar a los usuarios que iban en coche a la red fija pública. Ya en 1960 aparece un nuevo sistema propuesto por los laboratorios BELL, que se llamaba IMTS (Improved Mobile Telephone Service) que incluían mejoras de ancho de banda y servicios como la marcación directa. Gracias a este sistema, los primeros móviles analógicos nacieron basados en el IMTS y se hacían llamar “celular”, el motivo es porque el sistema básico de cobertura se divide en pequeñas áreas denominadas celdas, donde en cada una de ellas hay un transmisor de baja potencia, apareciendo con este sistema de celdas la reutilización de frecuencias.

La primera generación de móviles, 1G (First Generation), se destaca por dos mejoras realizadas en los años 70, la invención del microprocesador y la digitalización del control del enlace entre la estación móvil, MS (Mobile Station) y la estación base, BS (Base Station). Esta primera generación fue lanzada por los EEUU y se denominaba AMPS (Advantage Mobile Phone System), utilizaba tecnología FDMA (Frequency Digital Multiple Access) y permitía a los usuarios realizar llamadas dentro de un mismo país.

La segunda generación, 2G aparece a finales de la década de los 80, esta vez la digitalización aparece también en la transmisión de la señal de voz. Además de mejorar la calidad de servicio, se consigue mejorar el coste para los usuarios. Esta generación se puede denominar GSM (Global System of Mobile Communications), la primera generación que utiliza TDMA (Time Division Multiple Access).

En cuanto a la tercera generación, 3G, proporciona comunicaciones a una velocidad mayor, incluyendo servicios de voz, fax e Internet en cualquier momento y en cualquier lugar. Con esto se abre un camino a aplicaciones y servicios innovadores como el entretenimiento multimedia, servicios de localización y muchos otros. Un paso intermedio hasta llegar aquí fueron las redes de 2.5G, denominadas GPRS (Global Packet Radio Service). La tecnología 3G, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) alcanza capacidades al día de hoy de 14,4 Mbps, donde se combina UMTS y HSPA (High Speed Access Packet). En este último se podrán encontrar información claramente distinguida entre el enlace descendente y el enlace ascendente, siendo HSDPA para el primero y HSUPA para el segundo.



Los servicios multimedia requieren grandes capacidades y bajas latencia, lo cual no llega a ser del todo cierto en escenarios reales, ya que este máximo comentado es difícil de alcanzar. El objetivo de las tecnologías HSPA+ y LTE es mejorar este servicio a través de nuevas técnicas de codificación avanzadas y de la utilización de sistemas multiantena (MIMO, Multiple Input Multiple Output). Esta tecnología es considerada de banda ancha, ya que para conseguir estos objetivos es necesario manejar canales de 20 MHz.

Puesto que la potencia necesaria para el transmisor es directamente proporcional al ancho de banda de la señal, el área de cobertura de una estación base para la red de cuarta generación es de diámetro reducido. Por tanto la tecnología inalámbrica de cuarta generación no viene a sustituir a la de tercera, sino a complementarla.

Los factores que influyen en el desarrollo de las redes de cuarta generación son:

- El auge de Internet, cuya tendencia en la actualidad es su uso por medios inalámbricos.
- La disponibilidad de servicios de valor añadido a los usuarios de Internet móvil (reservas aéreas, transacciones, etc.).
- La proliferación de asistentes digitales personales y computadores personales de bolsillo.
- La oferta de servicios donde los dispositivos interactúan con otros, a nombre de los usuarios.
- La tendencia a la implantación de tarifas planas para los servicios de datos celulares hace necesario evolucionar a tecnologías más eficientes que permitan, por un lado aumentar la capacidad de la red, y por otro, reducir el coste por bit para mantener los márgenes de los operadores.

1.1.1 Características más destacadas de LTE

La tecnología *Long Term Evolution (LTE)*, nombre asignado por el 3GPP, constituye la alternativa natural de migración a la 4G en Europa debido a su compatibilidad con GSM, GPRS y UMTS, estándares dominantes en el continente.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

Presenta entre sus metas el reducir el coste por bit, el aumento de la eficiencia, la ampliación y mejora de los servicios ya prestados, permitir un uso flexible del espectro empleando nuevas y existentes bandas de frecuencias, simplificar la arquitectura y mejorar la integración manteniendo estándares abiertos, conseguir un consumo razonable en los terminales y costes de despliegue muy reducidos.

Se han detallado los siguientes criterios de cara a la especificación de la nueva tecnología:

- Tasas de transferencia máximas: hasta 100 Mbps instantáneos en sentido descendente, empleando 20 MHz, y hasta 50 Mbps instantáneos, empleando también 20 MHz.
- Capacidad en el plano de control: hasta 200 usuarios por célula por cada 5 MHz de espectro.
- Latencia en el plano de usuario: menos de 5 ms en condiciones descarga para pequeños paquetes IP.
- Canal de usuario: 3 ó 4 veces mayor que lo especificado para la Release 6 HSDPA en sentido descendente y 2 ó 3 veces mayor que para lo especificado para la Release 6 Enhanced Uplink.
- Movilidad: sistema optimizado para bajas velocidades entre 0 y 15 Km/h. Movilidad entre 15 y 120 Km/h con un rendimiento alto. Mantenimiento de la velocidad para altas velocidades comprendidas entre 120 Km/h y 350 km/h.
- Cobertura: los requisitos de caudal, eficiencia espectral y movilidad deben cumplirse para células de 5 Km, con ligeras degradaciones para células de 30 Km.
- Difusión multicast mejorada: ofrecer este servicio manteniendo la misma complejidad del terminal que en el caso de operación unicast.
- Flexibilidad en la asignación de espectro: la interfaz radio debe poder operar con asignaciones de espectro de diferentes tamaños: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, y 20 MHz. En la actualidad, una buena parte de las especificaciones se encuentran cerradas y están disponibles algunos equipos precomerciales que han probado en 2009 aunque no se prevén despliegues comerciales antes de 2010, por ahora en España no ha empezado el despliegue.

Para poder cumplir con los requisitos, LTE se sustenta en dos pilares principales: red de nueva generación "todo IP" (llamada SAE, System

Architecture Evolution) y una nueva interfaz radio (llamada E-UTRA, Evolved UTRA) basada en OFDM/MIMO. Los dos avances tecnológicos, OFDM y MIMO, dan lugar al concepto de altas tasas de transmisión de datos y son las bases de la evolución de comunicación celular y redes inalámbricas.

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es robusta frente al multitrayecto, muy habitual en los canales de radiodifusión. Debido a las características de esta modulación, es capaz de recuperar la información de entre las distintas señales que llegan con distintos retardos y amplitudes al receptor.

La tecnología MIMO, aprovecha el multitrayecto para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error, es decir aumenta la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica por medio de la utilización del dominio espacial. (Bases fijadas en [2], [3] y [4]). La solidez de la transmisión de OFDM, junto con las capacidades avanzadas de antena de MIMO, permite que más usuarios sean incluidos en el espectro disponible, a velocidades hasta cinco veces más rápidas que las que se pueden alcanzar con tecnologías 3G.

1.2 Objetivos proyecto

En este proyecto lo que se pretende analizar el comportamiento de sistemas MIMO dentro del nuevo protocolo de comunicaciones móviles LTE. Para ello se analizará la capacidad de sistemas MIMO en escenarios de 64 celdas, habiendo un único usuario por celda.

Todo ello se realiza a través de la simulación del modelo espacial de canal SCM (Spatial Channel Modulation), que es el modelo de trazado de rayos que según el 3GGP se utiliza en simulaciones previas y en tareas de planificación, para analizar las características de este nuevo protocolo.

Para el análisis, es fundamental el uso de algoritmos de coordinación de estaciones base, a través de ellos se calculará la capacidad del canal y se analizarán todos los resultados. De cara a este proyecto, son tres los algoritmos de coordinación de estaciones base, Uniforme, Waterfilling y Convex.

Además se comparará este modelo de trazado de rayos elegido para realizar las pruebas en este proyecto, con unas simulaciones utilizando un modelo más sencillo, donde el entorno de propagación se expresa con [5], [6] y [7]:

- Pérdidas de camino : se modelan a través de la siguiente ecuación:

$$PL = PL(d_0) + 10 * 3.8 \log(d/d_0) \quad [dB] \quad (1.1)$$



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

- La componente lenta de Shadow Fading, se modela a través de una Gaussiana: $N(0,8)$
- La componente de atenuación de pequeña escala Rayleigh se modela de la siguiente forma:

$$(N(0,1) + j N(0,1)) / \sqrt{2} \quad (1.2)$$

Para este análisis se realizarán varias pruebas con diferentes parámetros viendo así la influencia e importancia de cada uno de ellos. Los parámetros básicos del escenario son los propuestos para este tipo de comunicaciones según el 3GPP.

Ya que una de las características destacadas es la incorporación de sistemas MIMO, se detallan las ventajas que proporcionan.

- Proporcionar una mayor capacidad y un aumento notable de la eficiencia espectral.
- Mayor alcance.
- Mejora en la fiabilidad del canal.
- Satisfacer la demanda de alta velocidad de transmisión de datos sin necesidad de aumentar el ancho de banda disponible ni la potencia transmitida, etc.

Sin embargo, también añaden una mayor complejidad en las etapas transmisoras y receptoras así como una gran dependencia de las características del canal radio. Esto es debido a tener varias antenas en el transmisor y en el receptor.

Por lo tanto y debido a esta dependencia, es muy útil y necesario analizar el comportamiento en el canal con sistema multiantena y analizar los objetivos alcanzables dentro del marco de la nueva tecnología en comunicaciones móviles, LTE.



1.3 Estructura de la memoria

Esta memoria consta de seis capítulos diferentes, antes de comenzar, se hará un pequeño resumen para tener una idea general de lo que se puede encontrar en este documento.

El *Capítulo 1*, se corresponde con la presente introducción.

El siguiente capítulo, el *Capítulo 2*, es una introducción a los sistemas MIMO, además se describe el modelo de canal utilizado en este proyecto, el SCM, en detalle. Y se describen los diferentes métodos de coordinación de células que se han utilizado para la realización de las pruebas.

Notar que, aparte de la introducción de los sistemas MIMO, en este apartado se explica en detalle las ventajas e inconvenientes de usar este sistema de comunicación dentro del marco que nos interesa en este caso, LTE.

El *Capítulo 3* se centra sobre todo en las características de LTE, parámetros esenciales para realizar todas las pruebas y poder comprobar si con ellos se llegan a los objetivos propuestos para la cuarta generación de móviles.

Ante de detallar los resultados, se aclaran las comprobaciones previas a la realización de las simulaciones. Está explicado en detalle en el *Capítulo 4*.

Uno de los últimos capítulos es el *Capítulo 5*, consta del desarrollo de todas las pruebas llevadas a cabo a lo largo de este proyecto. Los resultados se muestran a través de las técnicas de coordinación de estaciones base.

Por último, tenemos el *Capítulo 6*, que es un resumen de todo lo visto anteriormente y en el que se hablan de las debidas conclusiones.

Las líneas futuras que puedan servir para ampliar este proyecto se detallan en el *Capítulo 7*.

Se concluye el documento con la *Bibliografía*, *Pliego de condiciones*, *Presupuesto*, y *Glosario de términos y acrónimos*.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

2. Comunicaciones MIMO en entornos Multiusuario

La utilidad de los sistemas multiantena para mejorar las comunicaciones móviles siempre se ha conocido. Sin embargo, hasta hace unos veinte años, no se ha empezado a investigar y a evolucionar en este aspecto, obteniendo grandes mejoras en la transmisión de señales y en teoría de la información. Así, por lo tanto, en 1990s apareció el ya nombrado sistema multiantena MIMO.

Aunque las aplicaciones con este tipo de conceptos se pueden remontar a los años sesenta con aplicaciones militares, no ha sido hasta el año 2000, más o menos, cuando se ha empezado a incorporar en el mercado comercial. El primer hecho significativo fue la utilización de algoritmos de procesamiento de señal espacio-tiempo. Gracias al gran progreso del área de computación e integración de circuitos, se incluyó por primera vez en el estándar Release 7 de HSPA un sistema basado en MIMO. Poco después llegó el lanzamiento de LTE, que es el primer sistema celular de comunicaciones móviles diseñado con MIMO como componente clave desde el principio.

A continuación, se explican conceptos básicos teóricos para entender bien esta nueva tecnología y poder conocer todas las ventajas que conlleva su adaptación en las comunicaciones móviles.

Aunque las prestaciones de ambos son muy parecidas y ambas beneficiosas, se distingue entre sistemas MIMO con un único usuario y sistemas MIMO con multiusuario. La primera versión de LTE está basada en sistemas con un único usuario, sin embargo hay que notar el gran potencial que tendrá un sistema con varios usuarios por celda.

Por lo tanto se introducirá la teoría de MIMO hablando tanto de multiusuario como de un único usuario. Posteriormente se concretarán métodos reales adoptados en LTE y así poder tener una visión de las ventajas e inconvenientes que tiene utilizar esta teoría en LTE.

Mientras que las comunicaciones WIRELESS explotan el preprocesado de la señal en tiempo y frecuencia y los respectivos decodificados tanto en el transmisor como en el receptor, la utilización de más de una antena en ambas partes de la transmisión abre una gran puerta a otro tipo de dimensión, la dimensión espacial. Esta nueva dimensión espacio-tiempo consigue muchas mejoras en parámetros del enlace como por ejemplo la tasa de error, el área de cobertura y la eficiencia espectral (bps/Hz/celda).

Dependiendo del número de antenas que hay en el transmisor y en el receptor, podemos encontrar varios tipos de técnicas, SIMO (Single input Multiple Output) donde una única antena en el transmisor y varias en el receptor, al contrario que MISO (Multiple Input Single Output) o las ya conocidas MIMO.

Mientras que el enlace punto a punto entre una estación base multiantena y una estación móvil se denomina SU-MIMO (Single User MIMO), cuando estamos ante una comunicación donde una estación base transmite a varios usuarios dentro del mismo dominio tiempo-frecuencia, se denomina MU-MIMO (Multiple User MIMO).

Por lo tanto, si hay estaciones bases vecinas que comparten sus antenas en una nueva forma de comunicación MIMO con el mismo grupo de usuarios, se denominará sistema multicelda y multiusuarios.

Recaltar que este último sistema no está integrado en la primera versión del protocolo LTE, pero que se incluirá en posteriores versiones. En la figura se ven unos ejemplos de lo comentado hasta el momento.

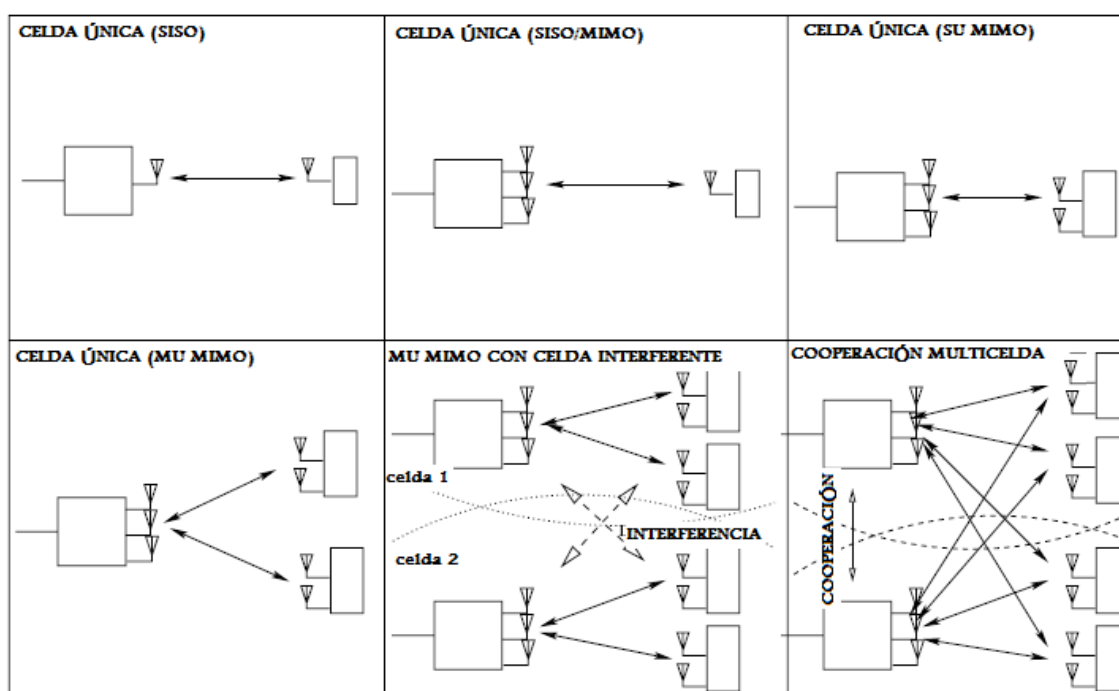


Figura 2.1 Evolución de la tecnología MIMO

Las ventajas principales que proporcionan este tipo de canal frente a los demás ([1]):

1) *Ganancia por diversidad espacial*: al transmitir y recibir por varias antenas simultáneamente, se puede mejorar la fiabilidad del enlace, mitigando los desvanecimientos y disminuyendo la probabilidad de error. Si los $S \times U$ enlaces del canal MIMO sufren desvanecimientos de manera independiente y la señal transmitida se construye de una manera adecuada, el receptor puede combinar las señales recibidas tal que la resultante compense en gran medida los desvanecimientos del canal SISO, mejorando así la relación señal a ruido (SNR) de la señal recibida.

Como en el receptor se recibirá así por lo tanto varias versiones de la señal, el incremento del número de copias independientes aumenta. Con ello la probabilidad de que al menos una copia no experimente profundos desvanecimientos también aumenta, mejorando la fiabilidad en recepción. Para un enlace con S antenas transmisoras y U antenas receptoras, existirán $S \times U$ enlaces independientes entre sí y por lo tanto una diversidad espacial de $S \times U$.

2) *Ganancia por multiplexado espacial*: se consigue mediante la transmisión de flujos de datos independientes por las diferentes antenas, de manera simultánea. El multiplexado de la información en un número de flujos igual a $K = \min(S, U)$, aumenta la velocidad global de transmisión de datos en un factor K sin mayores requerimientos de potencia ni ancho de banda, consiguiendo una eficiencia espectral próxima a la capacidad del canal y sin necesidad de conocer el estado del canal en el transmisor.

3) *Ganancia de array*: es el incremento de la relación señal a ruido media recibida, que resulta del efecto de la combinación coherente de señales en el receptor. Dicha combinación coherente de señales puede realizarse a través del procesamiento espacial en el array de antenas en recepción y/o del pre-procesado espacial en el array de antenas en transmisión. La ganancia de array mejora la resistencia al ruido, y de esta manera la cobertura de la red inalámbrica.

Para obtener esta ganancia, bien el transmisor o el receptor deben conocer el canal. Dado a que es más sencillo que el receptor conozca la respuesta del canal, la ganancia de array se suele implementar en el receptor (ya que para que la conozca el transmisor se requiere de un canal de realimentación).

4) *Reducción de interferencias*: las interferencias en la red inalámbrica se debe al hecho de compartir, con varios usuarios, los recursos en tiempo y frecuencia. Dichas interferencias pueden ser mitigadas en los sistemas MIMO explotando la dimensión espacial para aumentar la separación entre usuarios.

Si se persigue una ganancia por diversidad alta se sacrifica parte de la ganancia por multiplexado y viceversa, siendo posible solución de compromiso entre la ganancia por diversidad y la ganancia por multiplexado.

Además de las ventajas que proporcionan los canales MIMO, hay que tener en cuenta los inconvenientes para intentar poner remedios. La mayoría de los inconvenientes provienen de la cantidad de componentes multitrayecto o de la correlación del canal.

El multitrayecto es considerado uno de los mayores problemas en comunicaciones inalámbricas, ya que es producida por cualquier objeto circundante, edificios, coches, etc. Esto produce una fluctuación aleatoria denominada desvanecimiento que afecta seriamente a la calidad de la señal que llega al receptor, ya que esta señal se compone de un conjunto de señales con diferentes amplitudes y retrasadas en el tiempo. Si se utiliza una modulación correcta, la suma de estas señales puede reforzar la señal resultante.

En concreto, usando la modulación OFDM, se pueden aprovechar las múltiples contribuciones que llegan al receptor por el multitrayecto, en comparación con otras modulaciones digitales que sufren interferencia entre símbolos, ISI.

2.1 Canales MIMO

Como ya se ha comentado anteriormente, debido a que el número de elementos de transmisión en ambas partes del sistema aumenta, el número de canales dentro del canal radio pasa de ser uno a ser varios, ya que existirá un canal por cada elemento de transmisión en el transmisor y cada elemento de recepción en el receptor, valga la redundancia. Por lo tanto, la eficiencia espectral dentro del mismo ancho de banda aumenta.

En la siguiente figura se muestran los elementos básicos de un sistema MIMO con S antenas transmisoras y U antenas receptoras ([9]):

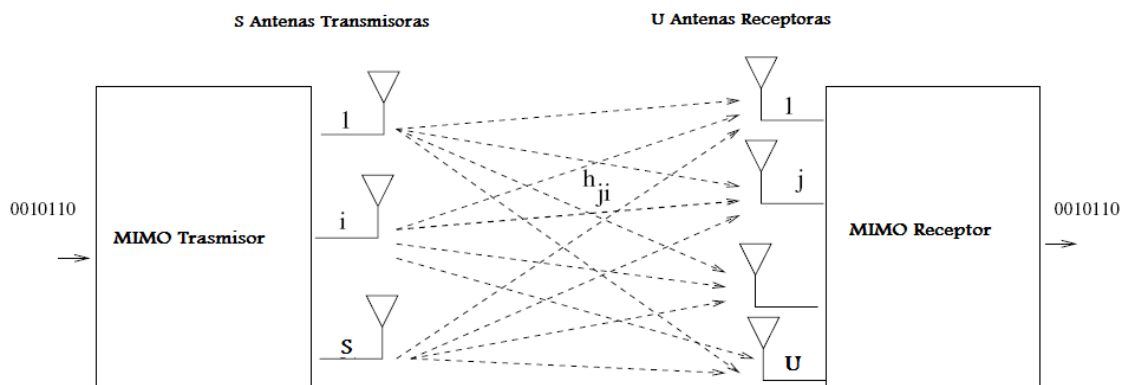


Figura 2.2: Sistema MIMO

Los K bits de información que se quiere enviar se denotan por $u(k)$ con $k=1,2,\dots,K$. Dicha secuencia llega al módulo de codificación espacio-temporal que realiza la tarea de construir, a partir de la secuencia de bits fuente $u(k)$, una secuencia de vectores de bits (o símbolos, según el tipo de código de canal utilizado) con una determinada estructura espacio-temporal que se denota por $c(k) = [c_1(k), c_2(k), \dots, c_S(k)]$ con $k=1,2,\dots,S$.

Se puede decir que esto mismo se realiza en el módulo del codificador de canal en un sistema SISO. Un elemento útil que también se utiliza en este caso, es el entrelazado. Con él se consiguen símbolos independientes y se mejora el uso del BW y de la potencia disponible. Al conseguir la independencia entre símbolos el decodificador puede usar algoritmos muchos más sencillos que en cualquier otro caso.

Además es muy útil en este caso porque en los canales con multitrayecto, los desvanecimientos causados por el canal suelen estar correlados. También porque si los errores de un bloque están agrupados en una ráfaga es más complicado recuperarlos y con el entrelazado se evita que aparezcan errores dentro de un mismo bloque.

Si estamos ante un canal AWGN, la utilización del entrelazado no aporta muchas ventajas, ya que en este caso ya estamos ante observaciones independientes entre sí. Pero en canales como el SCM, el entrelazado tiene las ventajas comentadas anteriormente.

Después de estos procesos tenemos la secuencia de símbolos que se transmiten $c'(k)$. Antes de modular estos símbolos se puede realizar un filtrado espacio-temporal para adaptar la potencia transmitida por cada antena a las características del canal. Para ello es necesario conocer en el transmisor la forma del canal y esto no es siempre posible.

Finalmente se modulará en un pulso y trasladándola al dominio de radiofrecuencia será radiada por una de las antenas transmisoras. Al transmitirse por el canal multitrayecto, en cada antena de recepción habrá una suma de las múltiples réplicas con distintas atenuaciones y diferentes retardos de todas las señales transmitidas. Además hay que tener en cuenta el ruido térmico que es sumado a la señal.

La señal que se consigue en el receptor tiene la siguiente forma:

$$x_j(t) = \sum_{l=1}^{N_t} h_{jl}(\tau, t) * s_l(t) + n_j(t) \quad (2.1)$$

Sabiendo que $s_i(t)$ es una secuencia de símbolos transmitidos de la siguiente forma:

$$s_i(t) = \sum_{k=1}^N s_i(k) \delta(t - kT_s) \quad (2.2)$$

Se puede agrupar las señales transmitidas en un vector y así poder expresar la relación entre entradas y salidas de un canal MIMO como:

$$x(t) = H(\tau, t) * s(t) + n(t) \quad (2.3)$$

Donde la $H(\tau, t)$ es la matriz de canal que se puede expresar de la forma:

$$H(\tau, t) = \begin{pmatrix} h_{11}(\tau, t) & h_{12}(\tau, t) & \dots & h_{1N_s}(\tau, t) \\ h_{21}(\tau, t) & h_{22}(\tau, t) & \dots & h_{2N_s}(\tau, t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_u1}(\tau, t) & h_{N_u2}(\tau, t) & \dots & h_{N_uN_s}(\tau, t) \end{pmatrix}$$

En esta matriz de canal se observa que existen tantas entradas y salidas como antenas en el transmisor y en el receptor haya respectivamente. Por ello el canal va a tener una nueva dimensión, la espacial.

Cada señal recibida por cada antena es pasada por un filtro adaptado a la forma del pulso con el que se moduló y muestreada al periodo de símbolo. Así se obtiene un conjunto de observaciones con las que se utilizarán para detectar los símbolos transmitidos.

En el caso de utilizar un modelo discreto, la ecuación básica que describe el modelo es:

$$x[k] = H[m, k] * s[k] + n[k] \quad (2.4)$$

donde la matriz de canal se define como:

$$H[m, k] = \begin{pmatrix} h_{11}[m, k] & h_{12}[m, k] & \dots & h_{1N_s}[m, k] \\ h_{21}[m, k] & h_{22}[m, k] & \dots & h_{2N_s}[m, k] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_u1}[m, k] & h_{N_u2}[m, k] & \dots & h_{N_uN_s}[m, k] \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, en el receptor, a partir de las muestras recibidas y deshaciendo las operaciones realizadas en el transmisor, se podrá conseguir los bits transmitidos.

En este proyecto se tiene en cuenta sólo el canal en banda estrecha, donde el ancho de banda de transmisión es muy pequeño en comparación con el ancho de banda de la señal. En estos casos la dispersión temporal del canal se puede despreciar frente el periodo de señalización de la señal transmitida, con ello se puede agrupar todos los coeficientes multitrayectos en un único término.

Así que podemos expresar la respuesta en el dominio del tiempo por medio de la ecuación:

$$x(t) = h \cdot s(t) + n(t) \quad (2.5)$$

Donde la matriz de canal es de la siguiente manera:

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_s} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N_u 1} & h_{N_u 2} & \dots & h_{N_u N_s} \end{pmatrix}$$

En este caso los elementos h_{us} representa el canal entre la antena transmisora “u” con la antena receptora “s”.

2.1.1 Capacidad en sistemas MIMO

El rendimiento de un canal MIMO se puede estudiar a través de la probabilidad de error o de la capacidad del canal. Gracias a las expresiones desarrolladas por Telatar [4], que son equivalentes a las presentadas por Shannon para canales MIMO, es posible cuantificar el rendimiento del canal en diferentes escenarios y situaciones. En estas expresiones se deja claro que la eficiencia espectral aumenta linealmente con el número de antenas. Como se mostrará, la capacidad del canal depende tanto de la relación señal a ruido en el receptor como de los valores propios de H .

La capacidad es la tasa binaria máxima por Herzio que se puede obtener cuando la probabilidad de error tiende a cero, a medida que se aumenta el tamaño del bloque de información transmitida.

Dos parámetros son importantes en la definición de eficiencia espectral MIMO, la relación señal a ruido (SNR) y el número de subcanales equivalentes con sus respectivas ganancias expresadas por los valores propios de H .

Desde el punto de vista de la teoría de la información, la capacidad se obtiene a través del concepto de información mutua máxima. Además, para obtener resultados coherentes la matriz de canal se normaliza con respecto a su ganancia.

Por lo tanto, la expresión teórica de la capacidad MIMO desde este punto de vista, se puede expresar de la siguiente manera:

$$C_{MIMO} = \log_2 \left[\det \left(I + \frac{\rho}{N_t} H^T H \right) \right] \text{ bps/Hz} \quad (2.6)$$

donde I es la matriz identidad de N elementos, ρ es la relación señal a ruido en la antena receptora y H es la matriz de transferencia del canal, de dimensiones $S \times B \times U \times A$ y H^T es la matriz compleja conjugada.

Hay que notar que la capacidad de un sistema MIMO es dependiente de la correlación existente entre los elementos de la matriz del canal, lo cual ocurre en diferentes condiciones de entorno y configuración del sistema. Dicha dependencia está relacionada con la polarización de los arrays, la separación entre elementos, distancia entre transmisor y receptor, nivel de relación señal a ruido, clase de entorno y, en menor proporción, con la variación de frecuencia de funcionamiento dentro de la banda.

Por ello, es importante realizar varias simulaciones modificando estos parámetros, ya que influirán en los resultados y con ellos las conclusiones pueden ser más exactas.

Nota: Una de las ventajas de los sistemas MIMO presentan mejores características en entornos donde la señal recibida proviene de entornos muy dispersivos, con contribuciones incorreladas e independientes. Por consiguiente, los entornos urbanos (fundamentalmente micro y picocelulares) son entornos adecuados para utilizar estas técnicas.



2.2 Canal SCM

El SCM (Spatial Model Channel), es un modelo de canal que está basado en la técnica de trazado de rayos y con él se pueden evaluar tanto algoritmos como sistemas de múltiples antenas.

Además, es el modelo de canal elegido por el 3GPP para realizar simulaciones previas a la implantación de LTE y así poder planificar el modelo de red que se necesita para alcanzar las previsiones necesarias.

Para caracterizarlo es necesario conocer los diferentes valores de los parámetros utilizados dependiendo del entorno usado para su simulación. En este capítulo, se describen en detalle estos parámetros tan necesarios y los pasos a seguir para obtener una simulación lo más parecida a los cálculos teóricos, que siempre serán más optimistas que las posteriores mediciones en la realidad.

Para describir un canal, habitualmente se definen parámetros que modelan la parte del enlace y otros parámetros que modelan la parte del sistema. La parte del enlace, está basada en parámetros que caracterizan un enlace entre un MS con una BS y no tiene en cuenta si el sistema completo consta de más elementos, es decir, no tendría en cuenta las posibles interferencias existentes. Sin embargo, el modelo de sistema consiste precisamente en eso, definir parámetros que influyen en una comunicación entre varios MS's y varias BS's, por lo tanto, se tendrán en cuenta las interferencias que puedan existir entre los diferentes elementos.

En la descripción del SCM [10], se encuentran ambas definiciones. Para este proyecto en concreto, lo que nos interesa es la parte de sistema. Así que, a partir de ahora, se hará mayor hincapié en esta parte, dejando a un lado el modelo de enlace.

2.2.1 Modelo de simulación para el SCM

Para comprobar que en una comunicación móvil se consiguen los objetivos necesarios para proporcionar un buen servicio, hay que evaluar y tener en cuenta dos enlaces importantes. El enlace ascendente (UL, Uplink), y el enlace descendente (DL, Downlink).

La descripción del SCM se centra en el enlace descendente, donde la BS transmite a la MS, que en este caso es el receptor. Sin embargo, todo el material que encontramos a continuación, se puede usar para el enlace ascendente también, con excepción del modelo de interferencia propuesto.

El código del canal SCM con el que vamos a trabajar, está preparado para poder coger varias BS's y varios MS's y así simular una comunicación móvil

completa. Aunque, en nuestro caso nos centraremos en una comunicación donde cada estación base, sólo tiene asignado un usuario, como ya hemos visto con anterioridad. Habiendo una posible mejora, de la que se hablará en apartados posteriores, donde se podrán utilizar más de una MS por cada BS.

Para calcular el throughput y el retardo del canal, se realizan “D” iteraciones para un sistema de multicelda y multiusuario en concreto. En una iteración, con la información del canal y de los diferentes MS’s, la BS decide a que MS transmitir. Normalmente en las diferentes “D” iteraciones, la posición de las BS y la distribución de las celdas en el espacio, permanece constante. Pero la localización de los MS’s varían aleatoriamente en el inicio de cada iteración.

Como se quiere simplificar la simulación, sólo una selección de las celdas entran en la simulación y las demás se asumen que transmiten con toda la potencia posible. Con esta descripción, lo que queremos conseguir es dar los parámetros temporales y espaciales que describan el canal entre una estación base y un móvil dado.

Para un array de antenas dentro de cada BS de “S” elementos y el array de antenas dentro de cada MS de “U” elementos, los coeficientes de canal para uno de los “N” elementos multipath viene dado por una matriz de $S \times U$ elementos de amplitudes complejas. La matriz de canal para los nth componentes multipath se denota como $H_n(t)$. Esta función, en principio es función del tiempo porque está influida por el Fast fading que supone el movimiento del móvil en el tiempo.

El modelo de rayos está basado en una técnica donde cada path se modela con un número de sub-paths como la suma de sinusoides. Cada uno de ellos representa una onda plana que es recibida individualmente por el array de antenas. Este modelo es relativamente sencillo de utilizar y además supone grandes ventajas frente a otras técnicas, ya que se tratan muchos aspectos importantes del canal simplemente asumiendo que los sub-paths son sinusoides. Entre ellos, se incluyen correlaciones espaciales entre los elementos de la antena y la autocorrelación resultado del espectro doppler. Ambos efectos provienen del ángulo spread y su definición depende directamente del él.

Hay que aclarar, que en este proyecto el efecto del tiempo no se tendrá en cuenta, a no ser que se incluya en apartados posteriores. Ya que se supondrán momentos fotográficos para cada los móviles sin movimiento. Además, de cara a analizar los paths, aunque al simularlo se lanzan los 6 paths, sólo se cogerá el que mayor potencia tenga en cada enlace entre una antena transmisora de la BS y una antena receptora de la MS, para simplificar así los cálculos [11].

Para generar la matriz de canal, se realizan tres pasos básicos:

- 1) Especificar el entorno:
 - Suburbano macro
 - Urbano macro
 - Urbano micro
- 2) Obtener los parámetros utilizados en la simulación y que están relacionados con el entorno elegido
- 3) Generar los coeficientes de canal basados en los parámetros anteriores.

A continuación se muestra un esquema donde se describe la obtención de los coeficientes de canal:

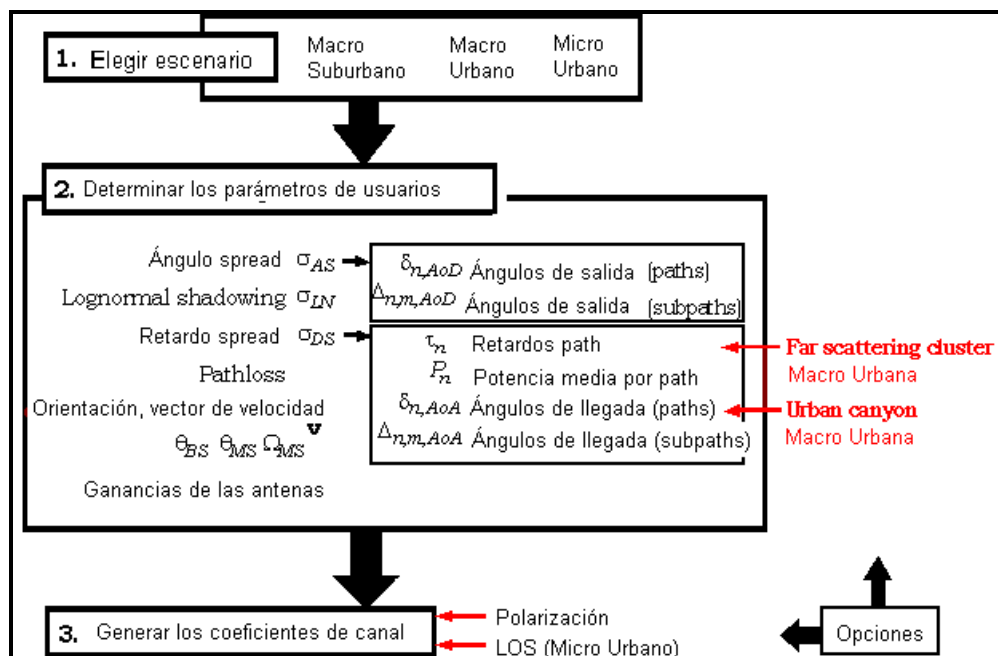


Figura 2.3 Esquema obtención coeficientes canal.

2.2.2 Definiciones generales, parámetros y asunciones.

Para aclarar el modelo de canal SCM, en este apartado se describen algunos parámetros necesarios para poder entender bien el comportamiento del canal y los parámetros de los que depende [11].

Se describe por lo tanto las características del path, el modelo de correlación y el modelo de canal.

2.2.2.1 Características del Path

En primer lugar, debemos tener claro que la señal recibida por el MS consiste en “N” replicas en el tiempo de la señal transmitida. Estas “N” replicas están definidas por amplitudes en potencia y retardos elegidos aleatoriamente de acuerdo con el procedimiento seguido para generar el canal y debido a las múltiples reflexiones que hay entre el Tx (Transmisor) y el Rx (Receptor). Cada path consiste en “M” sub-paths, como ya se anotó anteriormente. En la figura se muestra un ejemplo con varios retardos y distintas amplitudes.

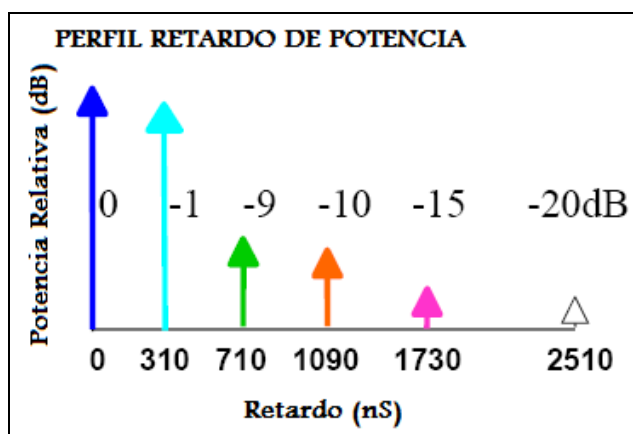


Figura 2.4 Ejemplo de retardo de potencia de un canal

Para modelar el canal, es necesario modelar cada path independientemente y esto depende directamente del ancho de banda. Para señales de banda ancha, el fading se caracteriza por el ángulo spread de las ondas planas recibidas por cada path.

En el caso evaluado en este documento, “M” toma el valor de veinte. En el caso de los paths, sólo se tendrá en cuenta uno de ellos, que será aquel que tenga mayor potencia. Como ya se ha dicho anteriormente.

En cuanto al espectro de potencia, se define el espectro de potencia Azimut (PAS) para cada path, que no es más que la distribución de potencia y del ángulo. Normalmente se asume que es una distribución Laplaciana. Como se ve en la figura, el centro de la distribución es cero grados relativos con respecto a la media del AoA o del AoD.

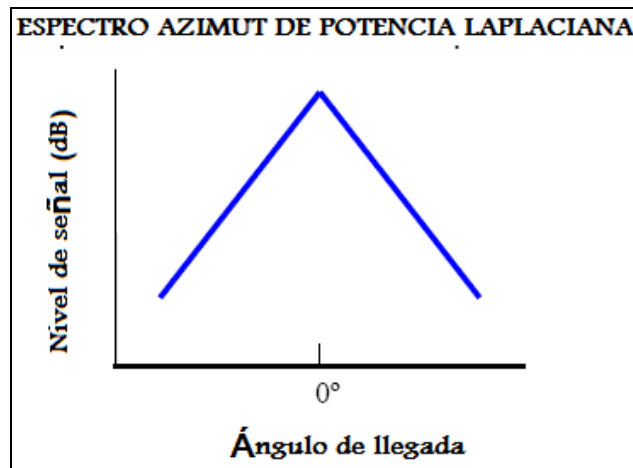


Figura 2.5 PAS

La figura siguiente muestra el modelo multipath utilizado en este caso, donde están definidos todos los parámetros que contribuyen en él.

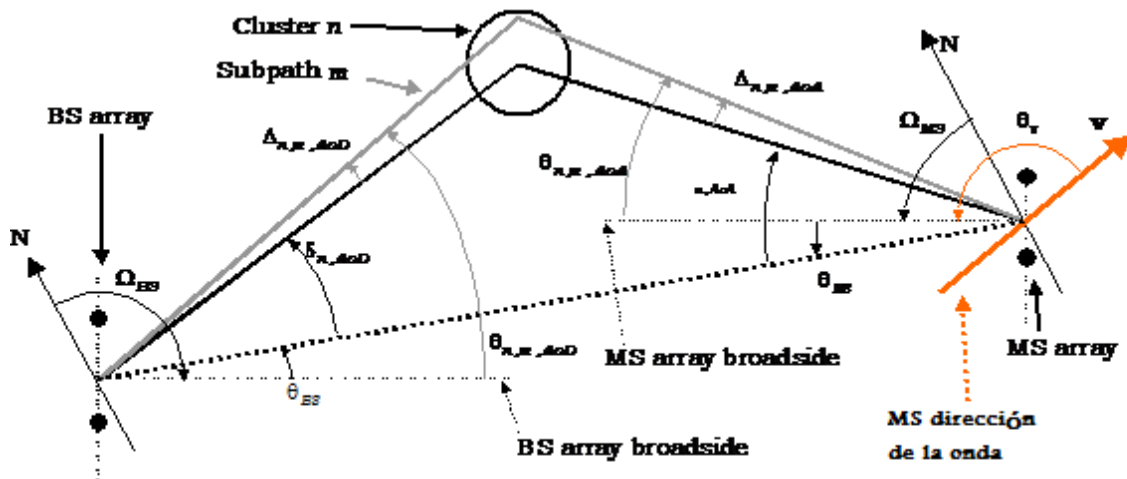


Figura 2.6 Modelo multipath SCM

Para el nivel de sistema, el Fast-fading por path viene envuelto en tiempo, también la mayoría de los parámetros como el ángulo Spreads (AS), delay Spreads (DL), el desvanecimiento log-normal y la localización del móvil permanecen constante durante la ejecución de una iteración.

2.2.2.2 Modelo de correlación

El modelo de correlación se refiere a la correlación presente en las diferentes muestras. En este modelo incluimos los tres tipos de correlación, en el tiempo, en la frecuencia y en el espacio.

La correlación en frecuencia describe la selectividad en frecuencia del canal, que no es más que el cambio que se produce en los niveles de la señal en función del cambio en frecuencia. El parámetro de la señal que está

directamente relacionado con ella es el ancho de banda coherente del canal. De hecho, en señales con un ancho de banda coherente mayor a 1 MHz se debe observar grandes variaciones en la señal por este efecto.

En cuanto a la correlación en tiempo, describe los cambios en el desvanecimiento de la señal en función del tiempo, como su propio nombre indica. Esta correlación es análoga a la distancia entre muestra que está normalizada a la longitud de onda.

La última correlación que podemos tener, la correlación en el espacio, se encarga de definir la correlación que hay entre las antenas. Depende directamente de condiciones de la señal como el ángulo de llegada AoA, el espectro de potencia PAS, el espacio entre las antenas y el ancho de banda del sistema. Además, se debería incluir el efecto de la polarización de la antena.

Se detalla a continuación tanto la correlación espacial como la correlación en frecuencia, que son las dos que más vamos a tener en cuenta.

1- Correlación Espacial.

La correlación entre antenas separadas una distancia “d” se puede calcular utilizando la función definida a continuación. Se define la función de densidad como $p(\phi)$ que en este caso es una distribución Laplaciana, donde ϕ_a es la media de AoA.

$$R_{BS} = \int_{-4\pi+\phi_a}^{4\pi+\phi_a} p(\phi_i - \phi_a) \exp\left\{j \frac{2\pi d_{BS}}{\lambda} \sin(\phi_i - \phi_a)\right\} d\phi_i \quad (2.6)$$

$$R_{MS} = \int_{-4\pi+\phi_a}^{4\pi+\phi_a} p(\phi_i - \phi_a) \exp\left\{j \frac{2\pi d_{MS}}{\lambda} \sin(\phi_i - \phi_a)\right\} d\phi_i \quad (2.7)$$

Un gráfico ilustrativo de este efecto es el que se muestra a continuación, donde se aprecia claramente como la señal va cambiando en función de la distancia.

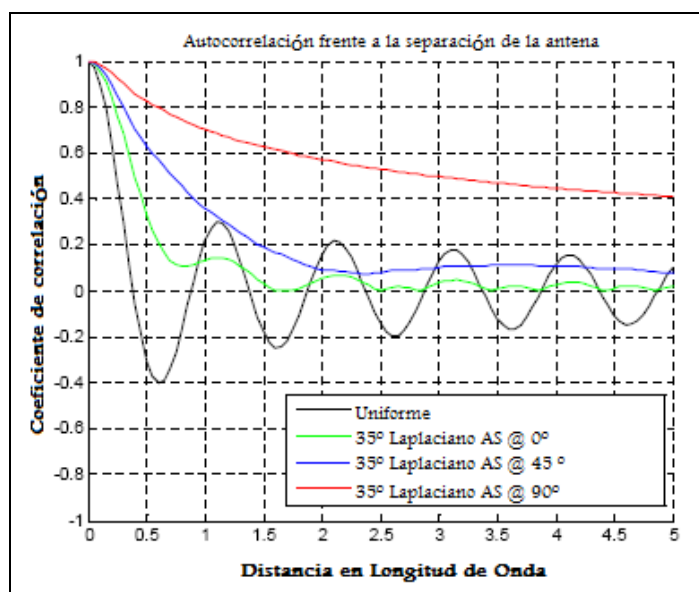


Figura 2.7 Autocorrelación frente a separación de antena

Como se puede ver utilizando el AS (Angle Spread) seleccionado, en este caso 35° , se consigue un aumento de la correlación entre las señales comparándolo con el uniforme o con el efecto típico Doppler.

Las diferentes representaciones son para el mismo ángulo Spread pero para diferentes ángulos de llegada, 0° , 45° y 90° . Esta componente en el SCM es aleatoria, por lo que la comprobación de la dependencia de la separación entre antenas posterior dependerá de este hecho.

2- Selección en frecuencia.

Si el canal está modelado a través de un número discreto de retardos provenientes del multi-path, la respuesta en frecuencia del canal se basa en el efecto producido al combinar los componentes multi-path. Esto se denomina función de correlación

2.2.2.3 Modelo de canal

Para modelar el efecto de la multi-antena, es necesario modelar un canal con las propiedades de correlación entre las antenas. Las múltiples antenas se suele expresar como una combinación de $M \times N$, donde M es el número de antenas en el transmisor y N es el número de antenas en el receptor. Las configuraciones típicas y que se evaluarán en este proyecto son: 1×1 (SISO), 2×2 , 4×4 .

Para aclarar el modelo de canal se da un ejemplo de un canal 2×2 . En este canal aparecerán cuatro conexiones diferentes entre las antenas del transmisor y las antenas del receptor. Se puede ver claramente en la figura que se muestra posteriormente.

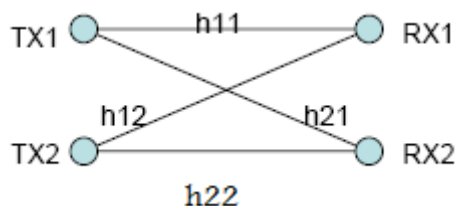


Figura 2.8 Modelo canal 2x2

Hay que tener en cuenta las siguientes asunciones para cualquier modelo elegido, independientemente del entorno en cuestión:

- Reciprocidad en el DL y el UL: los valores de AoD/AoA, son idénticos en ambos enlaces.
- Para sistemas FDD (Frequency Division Domain), las fases aleatorias de los subpath entre UL, DL no están correladas (para sistemas TDD (Time Division Domain) están completamente correladas).
- Los desvanecimientos de los diferentes móviles están incorrelados. En la práctica, si los móviles están muy cerca, no se debería asumir, pero en este caso se hace para simplificar el problema.
- El modelo SCM permite seleccionar cualquier tipo de configuración de antena. En este proyecto se han utilizado inicialmente antenas omnidireccionales.

2.2.3 Entornos utilizados

Lo normal en sistemas de comunicaciones móviles es encontrarse tres entornos diferentes, se pueden distinguir:

- Macro celda:
 - Suburbano (la distancia entre BS y MS es de 3 km).
 - Urbano (la distancia entre BS y MS es de 3 km).
- Micro celda:
 - Urbano (la distancia entre BS y MS es menor de 1 km).

Ha que en cuenta que las características del entorno macro celda asume que las antenas de la estación BS estan sobre el suelo. Sin embargo, para el entorno micro celda se asume que estan por encima de la altura del suelo. Se muestra a continuación los parámetros utilizados para los diferentes entornos.

Tabla 2.1 Característica entornos

Escenario del canal	Suburbano Macro	Urbano Macro	Urbano Micro
Número de paths (N)	6	6	6
Número de sub-paths (M) por path	20	20	20
Medias AS y BS AS de BS como una lognormal RV $\sigma_{AS} = 10^{\wedge}(\varepsilon_{AS}x + \mu_{AS}), x \sim \eta(0,1)$	$E(\sigma_{AS})=5^0$ $\mu_{AS} = 0.69$ $\varepsilon_{AS} = 0.13$	$E(\sigma_{AS})=8^0, 15^0$ $8^0 \mu_{AS} = 0.810$ $\varepsilon_{AS} = 0.34$ $15^0 \mu_{AS} = 1.18$ $\varepsilon_{AS} = 0.210$	NLOS: $E(\sigma_{AS})=19^0$ N/A
$r_{AS} = \sigma_{AoD} / \sigma_{AS}$	1.2	1.3	N/A
Por path AS de BS (Fijo)	2 grados	2 grados	5 grados (LOS y NLOS)
BS por path AoD Distribución Estandar	$\eta(0, \sigma_{AoD}^2)$ donde $\sigma_{AoD} = r_{AS}\sigma_{AS}$	$\eta(0, \sigma_{AoD}^2)$ donde $\sigma_{AoD} = r_{AS}\sigma_{AS}$	U(-40grados, 40grados)
Media AS en MS	$E(\sigma_{AS, MS})=68^0$	$E(\sigma_{AS, MS})=68^0$	$E(\sigma_{AS, MS})=68^0$
Por path AS en MS (Fijo)	35^0	35^0	35^0
MS Por path AoA Distribución	$\eta(0, \sigma_{AoA}^2(\text{Pr}))$	$\eta(0, \sigma_{AoA}^2(\text{Pr}))$	$\eta(0, \sigma_{AoA}^2(\text{Pr}))$
Retardo spread (DS) como una lognormal RV $\sigma_{DS} = 10^{\wedge}(\varepsilon_{DS}x + \mu_{DS}), x \sim \eta(0,1)$	$\mu_{DS} = -6.80$ $\varepsilon_{DS} = 0.288$	$\mu_{DS} = -6.18$ $\varepsilon_{DS} = 0.18$	N/A
Media total RMS Retardo Spread (DS)	$E(\sigma_{DS})=0.17 \mu s$	$E(\sigma_{DS})=0.65 \mu s$	$E(\sigma_{DS})=0.251 \mu s$ (salida)
$r_{DS} = \sigma_{delays} / \sigma_{DS}$	1.4	1.7	N/A
Distribución por path retardos			U(0, 1.2 μs)
Desviación lognormal estandar, σ_{SF}	8dB	8dB	NLOS: 10dB LOS: 4dB
Modelo de Path loss (dB), d está en metros	$31.5 + 35\log_{10}(d)$	$34.5 + 35\log_{10}(d)$	NLOS: $34.53 + 38\log_{10}(d)$ LOS: $30.18 + 26*\log_{10}(d)$

Para aclarar la utilización de los Modelo para los diferentes entornos, se realizan una serie de asunciones.

- 1) El path loss del modelo macro celda COST231 Hata urbano se calcula de la siguiente manera:

$$PL[dB] = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{bs})) \log_{10}\left(\frac{d}{1000}\right) + 45.5 + (35.46 - 1.1h_{ms}) \log_{10}(f_c) - 13.82 \log_{10}(h_{bs}) + 0.7h_{ms} + C \quad (2.8)$$

Las variables de las que depende el Path loss, son:

- h_{bs} es la altura de la BS en metros.
- h_{ms} es la altura de la MS en metros.
- f_c es la frecuencia portadora en MHz.

- d es la distancia entre la BS ya la MS en metros.
- C es una constante con diferentes valores ($C = 0\text{dB}$ para macro suburbano y $C = 3\text{dB}$ para macro urbano).

Con los parámetros utilizados normalmente, $h_{bs} = 32\text{m}$, $h_{ms} = 1.5\text{m}$, y $f_c = 1900\text{MHz}$, las fórmulas del path loss quedan:

- Entornos macro suburbanos: $PL = 31.5 + 35\log_{10}(d)$
- Entornos macro urbanos: $PL = 34.5 + 35\log_{10}(d)$

- 2) El diagrama de radiación es el mismo utilizado que en el enlace, en este caso es:

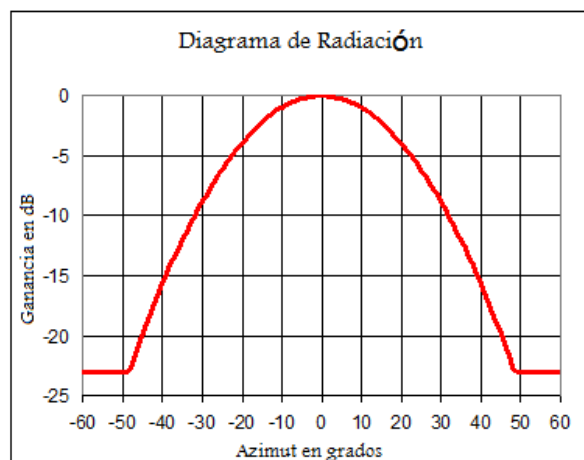


Figura 2.9 Diagrama de radiación

- 3) Correlación entre celdas SF es $\zeta = 0.5$.
- 4) Se asume que las celdas son hexagonales.

Para los parámetros micro celda, se asume lo mismo que los cuatro puntos anteriores, exceptuando el cálculo del path loss que se pueden realizar con las siguientes fórmulas:

- NLOS: $PL \text{ (dB)} = -55.9 + 38 \cdot \log_{10}(d) + (24.5 + 1.5 \cdot f_c / 925) \cdot \log_{10}(f_c)$.
- LOS: $PL \text{ (dB)} = -35.4 + 26 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f_c)$.

Los valores utilizados en este proyecto tanto la frecuencia como las distancias utilizadas se concretan en la sección en el apartado de Parámetros específicos. En esa sección se detallan los valores y el por qué de ellos.

Hay que notar que el modelo SCM que se describe en este capítulo y utilizado para este proyecto, sólo sirve para frecuencias inferiores a 5 MHz. En entornos LTE se utilizaran frecuencias superiores a este valor. Para ello es posible utilizar la actualización del SCM, el SCME.

2.2.4 Parámetros de usuarios.

Para calcular los parámetros de usuarios, como son: retardo de paths, potencias y los ángulos de llegada y de salida de cada subpath, hay que realizar una serie de pasos.

En esta sección se describe en detalle todos los pasos que se ha de seguir para calcular dichos parámetros tanto para entornos macro como para entornos micro.

En primer lugar se hace referencia a los parámetros macro que son los que realmente interesan de cara a la realización de las simulaciones en este proyecto.

2.2.4.1 Generación de parámetros para entorno Macro celda.

Los pasos a seguir para calcular los parámetros de usuarios de un entorno macrocelda son los que se describen a continuación.

1) Elegir entre entorno urbano o suburbano dependiendo del interés de la simulación a realizar.

2) Determinar los parámetros de orientación y distancia del entorno. Es necesario saber la posición de cada MS pertenecientes a cada BS, para ello es necesario conocer los ángulos y las distancias que hay entre ambos elementos del enlace. Hay que tener en cuenta que en un principio se utilizan antenas en la estación móvil omnidireccionales (diagrama de radiación de 360°).

Además, en este caso, al asumir que los móviles en cada instante de tiempo se van a analizar independientemente, la velocidad del móvil no se va a tener en cuenta. Podría ser un caso de estudio posterior si resultara interesante para el análisis en el que estamos.

3) Determinar el DS, AS y el SF. Estas variables se calculan a través σ_{DS} , σ_{AS} , y σ_{SF} , respectivamente. El cálculo de estos parámetros se explicarán en apartados posteriores.

NOTA: σ_{DS} , σ_{AS} , y σ_{SF} se expresa en segundos.

4) Determinar los retardos aleatorios para cada uno de los N componentes multipath, donde habitualmente se escoje N= 6 para la simulación de un canal SCM. Concretamente en este estudio, sólo se utilizará un multipath de los N calculados, por lo que sólo será necesario hallar dichos parámetros para este path.

A continuación se muestra la metodología seguida para calcular estos parámetros de forma general, hay que saber que en nuestro caso todo está calculado en una sola dimensión, porque solo tenemos un usuario por celda.

Las variables aleatorias se calculan con las fórmulas que tenemos a continuación:

$$\tau'_n = -r_{DS} \sigma_{DS} \ln z_n \quad n = 1, \dots, N \quad (2.9)$$

donde:

z_n ($n = 1, \dots, N$) es una v.a de distribución uniforme $U(0,1)$.

σ_{DS} se calcula en el paso anterior.

Estas variables se ordenan de la siguiente manera, ya que necesitamos localizar el retardo mínimo para calcular el retardo que nos interesa:

$$\tau'_{(N)} > \tau'_{(N-1)} > \dots > \tau'_{(1)} \quad (2.10)$$

Además del retardo mínimo, identificado con la ordenación que se realiza anteriormente, es necesario obtener el promedio siguiente:

$$\tau_n = \frac{T_c}{16} \cdot \text{floor} \left(\frac{\tau'_{(n)} - \tau'_{(1)}}{T_c/16} + 0.5 \right), \quad n = 1, \dots, N \quad (2.11)$$

Finalmente, se calcula el retardo con la siguiente fórmula:

$$\tau'_{(n)} - \tau'_{(1)} \quad (2.12)$$

5) Se tiene que calcular la potencia media para los N componentes multipath. En nuestro caso la media sería la componente en potencia del path que elijamos para realizar el estudio en cuestión.

La potencia sin normalizar vienen dada por:

$$P'_n = e^{\frac{(1-r_{DS})(\tau'_{(n)} - \tau'_{(1)})}{r_{DS} \cdot \sigma_{DS}}} \cdot 10^{-\xi_n/10} \quad (2.13)$$

Donde la variable ξ_n ($n = 1, \dots, 6$), es una v.a gaussiana con desviación típica de 3 dB. Esta fórmula define la potencia con los efectos aleatorios del desvanecimiento en cada path. Si tuviéramos N paths habría que hallar la media para calcular la potencia.

6) Determinar los ángulos de salida y de llegada para cada path. Se genera una variable aleatoria gaussiana de media cero:

$$\delta_n \sim \eta(0, \sigma_{AoD}^2), \quad n = 1, \dots, N,$$

Donde obtenemos la varianza como $\sigma_{AoD} = r_{AS} \sigma_{AS}$, y el valor del ángulo spread AS, se obtiene de la tabla de los diferentes entornos que vimos anteriormente, ya que este valor es diferente dependiendo del entorno que tratemos. Los valores de los ángulos vienen dados en grados.

7) Se asocia los retardos multipaths con AoDs. Para ello se asocian los valores de τ_n calculados en el paso 3 con los valores $\delta_{n,AoD}$ calculados en el apartado anterior.

8) Determinar las potencias, fases y el offset AoDs para los 20 sub-paths que se generan por cada path de la BS. Hay que notar que todos los sub-paths asociados a cada path tienen la misma potencia, en cuanto a la fase, $\Phi_{n,m}$, es una v.a que se distribuye uniformemente entre 0 y 360°. El offset relativo para cada subpath, es un valor fijo que se obtiene de la tabla, $\Delta_{n,m,AoD}$.

9) Determinar el AoAs para cada componente multipath. Los AoAs son v.a gaussianas

$$\delta_{n,AoA} \sim \eta(0, \sigma_{n,AoA}^2), \quad n = 1, \dots, N,$$

donde $\sigma_{n,AoA} = 104.12(1 - \exp(-0.2175|10\log_{10}(P_n)|))$ y P_n es la potencia relativa calculada en el paso 5.

10) Determinar el offset AoAs para cada UE de los $M = 20$ sub-paths que corresponden a cada path que proviene de los N paths. Como en el paso 8 para el cálculo de AoD offsets, el offset relativo de los m th subpath ($m = 1, \dots, M$) $\Delta_{n,m,AoA}$ es un valor fijo que lo sacamos de la tabla 1.2.

11) Asociar los paths y sub-paths de la BS y la MS. Los n th BS se asocian con los n th MS path.

12) Determinar el diagrama de radiación de la antena para los sub-path de la BS y los MS's en función de los respectivos AoDs y AoAs para cada sub-path. Para el path n th, el AoD of del sub-path m th (con respecto al array broadside de la Antena BS) es:

$$\theta_{n,m,AoD} = \theta_{BS} + \delta_{n,AoD} + \Delta_{n,m,AoD} \quad (2.14)$$

De la misma forma, el AoA del sub-path m th para el path n th (con respecto al array broadside de la antena MS) es:

$$\theta_{n,m,AoA} = \theta_{MS} + \delta_{n,AoA} + \Delta_{n,m,AoA} \quad (2.15)$$

Se debe saber que el diagrama de radiación de las antenas depende de los sub-paths AoDs y AoAs. Para la BS y el MS, viene dado a través de $G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})$ y $G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})$.

13) Aplicar las pérdidas entre BS y MS debido a la distancia que entre ellos, calculadas en el paso 2. Además del desvanecimiento plano determinado en el paso 3 y de los parámetros de potencia calculados para el modelo de canal por cada sub-path.

2.2.4.2 Generación de parámetros para entorno Urbano Micro celda.

El entorno urbano micro celda, difiere del entorno macro celda visto anteriormente, en que los desvanecimientos individuales multipath son independientes. Como vimos antes, se modela con $N=6$ paths, pero ya avisamos con anterioridad que se realizará el análisis eligiendo uno de los 6 paths utilizado.

Los pasos que se han de seguir, son muy parecidos a los seguidos en el entorno macro-celda, así que sólo se hará hincapié en aquellos que difieren del caso anterior.

- 1) Elegir entre entorno urbano micro-celda.
- 2) Determinar los parámetros de orientación y distancia del entorno.
- 3) Determinar los parámetros PL y log normal de los desvanecimientos.

4) Determinar los retardos aleatorios para cada uno de los N componentes multipath, donde habitualmente se escoje $N=6$ para la simulación de un canal SCM. Concretamente en este estudio, sólo se utilizará un multipath de los N calculados, por lo que sólo será necesario hallar dichos parámetros para este path.

Los retardos τ_n , $n = 1, \dots, N$ son variables aleatorias que se distribuyen uniformemente entre 0 y $1.2 \mu s$.

5) Se extrae el menor retardo de todos los calculados. Se realizan los mismos cálculos que en caso de macro-celda.

6) Se tiene que calcular la potencia media para los N componentes multipath. En nuestro caso la media sería la componente en potencia del path que elijamos para realizar el estudio en cuestión.

La potencia sin normalizar vienen dada por:

$$P'_n = 10^{-(\tau_n + z_n / 10)}$$

Donde la variable ξ_n está en microsegundos, y z_n ($n = 1, \dots, N$) es una v.a gaussiana de media cero y con una desviación típica de 3 dB.

Si se usa el modelo LoS, hay que condiderara el efecto de la componente directa en potencia dependiendo del ratio K :

$$P_n = \frac{P'_n}{(K+1) \sum_{j=1}^6 P'_j}, \quad P_D = \frac{K}{K+1} \quad (2.16)$$

7) Determinar los ángulos de salida y de llegada para cada path. Se genera una variable uniforme entre -40 y 40.

$$\delta_{n,AoD} \sim U(-40, +40), \quad n = 1, \dots, N, \quad (2.17)$$

Donde obtenemos la varianza como $\sigma_{AoD} = r_{AS} \sigma_{AS}$, y el valor del ángulo spread AS, se obtiene de la tabla de los diferentes entornos que vimos anteriormente, ya que este valor es diferente dependiendo del entorno que tratemos. Los valores de los ángulos vienen dados en grados.

- 1) Se asocia los retardos multipaths con AoDs. Para ello se asocian los valores de τ_n calculados en el paso 3 con los valores $\delta_{n,AoD}$ calculados en el apartado anterior.
- 2) Determinar las potencias, fases y el offset AoDs para los 20 sub-paths que se generan por cada path de la BS. Hay que notar que todos los sub-paths asociados a cada path tienen la misma potencia, en cuanto a la fase, $\Phi_{n,m}$, es una v.a que se distribuye uniformemente entre 0 y 360°. El offset relativo para cada subpath, es un valor fijo que se obtiene de la tabla, $\Delta_{n,m,AoD}$.
- 3) Determinar el AoAs para cada componente multipath. Los AoAs son v.a gaussianas

$$\delta_{n,AoA} \sim \eta(0, \sigma_{n,AoA}^2), \quad n = 1, \dots, N,$$

Donde $\sigma_{n,AoA} = 104.12(1 - \exp(-0.2175|10\log_{10}(P_n)|))$ y P_n es la potencia relativa calculada en el paso 5.

- 4) Determinar el offset AoAs para cada UE de los $M = 20$ sub-paths que corresponden a cada path que proviene de los N paths. Como en el paso 8 para el cálculo de AoD offsets, el offset relativo de los m th subpath ($m = 1, \dots, M$) $\Delta_{n,m,AoA}$ es un valor fijo que lo sacamos de la tabla 1.2.
- 5) Asociar los paths y sub-paths de la BS y la MS. Los n th BS se asocian con los n th MS path.
- 6) Determinar el diagrama de radiación de la antenna para los sub-path de la BS y los MS's en función de los respectivos AoDs y AoAs para cada sub-path. Para el path n th, el AoD of del sub-path m th (con respecto al array broadside de la Antena BS) es:

$$\theta_{n,m,AoD} = \theta_{BS} + \delta_{n,AoD} + \Delta_{n,m,AoD} \quad (2.18)$$

De la misma forma, el AoA del sub-path m th para el path n th path (con respecto al array broadside de la antenna MS) es:

$$\theta_{n,m,AoA} = \theta_{MS} + \delta_{n,AoA} + \Delta_{n,m,AoA} \quad (2.19)$$

Se debe saber que el diagrama de radiación de las antenas depende de los sub-paths AoDs y AoAs. Para la BS y el MS, viene dado a través de $G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})$ y $G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})$.

- 7) Aplicar las pérdidas entre BS y MS debido a la distancia que entre ellos, calculadas en el paso 2. Además del desvanecimiento plano determinado en el paso 3 y de los parámetros de potencia calculados para el Modelo de o de canal por cada sub-path.

2.3 Coordinación de estaciones base.

Después de generar los diferentes canales SCM se utilizan varios algoritmos de coordinación de estaciones base, con el objetivo de cancelar las interferencias y conseguir una mayor tasa de transmisión.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

Para poder observar el comportamiento del canal SCM y comparar los algoritmos entre sí, es necesario aclarar que algoritmos de coordinación se han utilizado. La base de ellos fue presentada en un paper de Globecom y aquí se hará un pequeño resumen de la toda la información que podemos encontrar en él [5].

Como se anticipado anteriormente, una de las ventajas de los canales MIMO es la utilización de la multiplexación espacial, SDM. Esta multiplexación, para lograr los beneficios que aporta, necesita una relación SINR elevada. El problema que tenemos en los canales MIMO, es que existen ciertas interferencias que hacen que este parámetro sea menor de lo que necesitamos. Por ello, surge la idea de implementar algoritmos que coordinen las estaciones base y conseguir por lo tanto la reducción de interferencias.

Conociendo las interferencias en el transmisor, se pueden utilizar varias técnicas de coordinación de estaciones base. Entre ellas está la denominada CBST (Coordinated Base Station Transmission). Otro algoritmo posterior es el ZF (Zero-Forcing), que aunque es menos óptimo, no necesita la información en la parte del transmisor. Este último proporciona la tasa obtenida por cada antena de cada estación base.

Los algoritmos de coordinación están basados en ZF- CBST con el objetivo de maximizar la suma de las tasas de los usuarios en el sistema de celdas en el que nos encontramos. Esto se refleja a través del método Waterfilling y el Waterfilling modificado. Mientras que el primero logra capacidades altas en sistemas selectivos en frecuencias con un único usuario por celda, el modificado sirve también para entornos multiusuario.

Una manera de reducir la complejidad del problema es utilizando la optimización convex. El problema que se plantea es la asignación de potencias a través de una función logarítmica, además las restricciones usadas son lineales. Por lo tanto, es un problema perfecto para ser resuelto con las aproximaciones de la función convexa.

Por lo tanto aclarar que los resultados mostrados en gráficas posteriores vienen dados a través de tres algoritmos diferentes. El primero es el uniforme, que realmente asigna la misma potencia a todos los usuarios, siendo esta el máximo valor que cumpla con las restricciones.

El segundo algoritmo es el waterfilling modificado, cuya solución se resume en encontrar una constante K que resuelva el siguiente problema:



$$P_{ij} = \left[K \frac{\alpha_i}{\Omega_{ij}} - \frac{1}{\lambda_{ij}} \right]^+ \quad (2.20)$$

Hasta llegar a esa ecuación hay una serie de pasos que para su mejor entendimiento es recomendable ir a la referencia nombrada con anterioridad [5].

El tercer y último algoritmo es la optimización ya comentada, convex.

3. Escenarios

Es importante conocer que escenarios se han utilizado para evaluar el canal SCM. En primer lugar, en este capítulo, se detallará la metodología seguida para la distribución de las celdas y de los usuarios. Posteriormente se hablará de las características más precisas que podemos encontrar en un escenario LTE, apoyándonos en la información proporcionada por el 3GPP.

Para finalizar, se detallan los parámetros exactos que se han empleado en este proyecto. Intentando aclarar el motivo de la elección de los valores utilizados para las diferentes simulaciones.

3.1 Distribución de celdas y usuarios

El simulador que se utiliza para representar las diferentes estaciones bases y los usuarios, está parametrizado de tal forma que podemos jugar con diferentes elementos del sistema, principalmente podemos citar los siguientes: número de usuarios en la red y su distribución en la misma, número de estaciones bases, el tamaño de la red, número de sectores por estación base, modelado de pérdidas.

La distribución de las estaciones bases está programada de manera muy eficiente, para ello se utilizan dos configuraciones diferentes, la toroidal y la concéntrica.

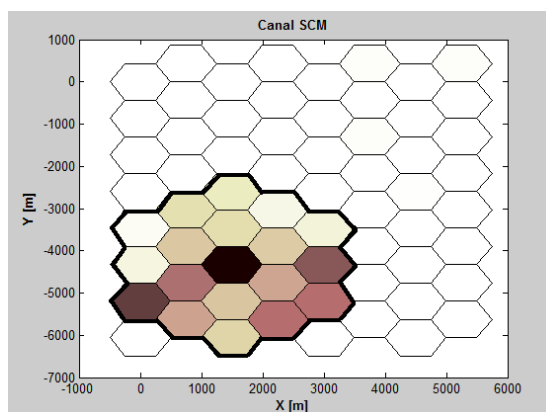


Figura 3.1: Distribución de celdas

En la figura se aprecian las estaciones bases, modeladas como hexágonos que están distribuidas de forma toroidal. Las diecinueve celdas que aparecen en otro color, son aquellas que están distribuidas concéntricamente. De hecho, son

aquellas que interfieren con la estación base central, que en ese caso será el centro de los cálculos.

Conociendo el tamaño de nuestra red, las estaciones se distribuyen de forma toroidal, visualmente es un rectángulo, pero las estaciones influyen las unas con las otras de forma toroidal. Este último se consigue agrupando nuestras celdas formando una serie de anillos y consiguiendo así la una unidad concéntrica.

Realmente, una vez obtenidas las coordenadas de las estaciones bases y las coordenadas de los usuarios, estas se introducen directamente al SCM y calcula la matriz de canal. Es decir, el escenario anterior, para este modelo de canal, sólo sirve para elegir los usuarios correspondientes a cada estación.

Inicialmente se generan aleatoriamente y uniformemente diez mil usuarios y se asignarán un usuario a cada estación, tantas como haya en nuestro escenario total.

Los parámetros de pérdidas, tanto el path loss como el shadowing, se han cogido de los modelos utilizados en el SCM y explicados en el capítulo 2. Aclarar que aunque se ha utilizado el simulador anterior, se ha adaptado para que utilice los modelos correctos acordes con la simulación y el cálculo de la matriz de canal posterior.

El modelo concéntrico anterior, pre-supone que solo influirán un número concreto de celdas alrededor de una, dependiendo del tamaño del escenario. En el capítulo siguiente se podrá ver que con el canal SCM ocurre de forma similar, con lo que se puede suponer que realmente está influyendo ese número de celdas.

3.2 Escenarios LTE

Para poder evaluar las características de EUTRA de LTE Advance, es necesario aclarar de las características los escenarios con los que se podrá llevar a cabo tal evaluación. [8]

En primer lugar se suponen ciertas asunciones para EUTRA, HSDPA/HSUPA (UTRA), que se han estudiado con anterioridad en el 3GPP 25913 [9]. A continuación nos centraremos en las especificaciones para UE y los Nodos-Bs, que vienen dadas a través de modelo de canal y de tráfico.

3.2.1 Dimensiones de las celdas.

Las dimensiones de las celdas y otros parámetros relacionados, dependerán del tipo de escenario al que nos refiramos. Se especificarán las características tanto para sistemas Macro como para sistemas Micro.

El despliegue de sistemas Macro es suficiente para caracterizar y evaluar UTRA y EUTRA. Los parámetros que están definidos para el despliegue del modelo Macro-cell por el 3GPP, vienen en la tabla 3.3.

De cualquier forma, en la primera tabla mostrada están los casos mínimos que se deberían usar según el 3GPP, añadiendo además características específicas para caso como son: Frecuencia Central (CF), Distancia Inter-celda (ISD), el ancho de banda operativo (BW), las pérdidas de penetración (PL) y la velocidad del UE. Habrá que tener en cuenta que todos los usuarios tendrán asignados el mismo Path loss y la misma velocidad.

Tabla 3.1 – UTRA y EUTRA casos

Simulación	CF	ISD	BW	PLoss	Velocidad
Casos	(GHz)	(metros)	(MHz)	(dB)	(km/h)
1	2.0	500	10	20	3
2	2.0	500	10	10	30
3	2.0	1732	10	20	3
4	0.9	1000	1.25	10	3

En la tabla 3.4, vienen dados los parámetros que se han de utilizar para la simulación de sistema de un escenario micro-celda con un sistema MIMO. Pero los 2 casos con los parámetros mínimos para un escenario micro-celda utilizado en un sistema MIMO los podemos ver en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 3.2 EUTRA casos de simulación para micro-cell MIMO

Simulación	CF	ISD	BW	PLoss	Velocidad
Casos	(GHz)	(metros)	(MHz)	(dB)	(km/h)
Outdoor-to-outdoor	2.0	130	10	Na	3/30
Outdoor-to-indoor	2.0	130	10	Na*	3

* El Path loss, está incluido en los modelos dependientes de la distancia.

La tabla principal con los parámetros generales para simular un entorno multiantena en LTE se muestra en la primera de las siguientes tablas y es el modelo que se ha utilizado para las simulaciones de este proyecto. En cuanto a la tabla 3.4, contiene información para realizar simulaciones en entorno micro-celda.

Tabla 3.3 - Parámetros para simulación de sistema Macro-cell





Parámetro		Asunción
Sistema celular		Grid hexagonal, 19 celdas por grupo, 3 sectores por celda
Distancia entre celdas (ISD)		Ver tabla 3.1
Path loss dependiente de la distancia		$L = I + 37.6 \log_{10}(.R)$, R en kilometros $I = 128.1 - 2\text{GHz}$, $I = 120.9 - 900\text{MHz}$
Desvanecimiento Lognormal		Similar en UMTS 30.03, B 1.4.1.4
Desviación típica de desvanecimiento		8 dB
Correlación en distancia del desvanecimiento		50 m (Ver D,4 en UMTS 30.03)
Correlación de desvanecimiento	Entre celdas	0.5
	Entre sectores	1.0
Pérdidas de penetración		Ver Tabla 3.1
Diagrama de radiación [4] (horizontal) (Para 3-sectores por celda con un diagrama de radiación fijo)		$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ $\theta_{3dB} = 70$ grados, $A_m = 20$ dB
Frecuencia central / Ancho de banda		Ver Tabla 3.1
Modelo de canal		Urbano típico (TU) Modelo de o de canal espacial (SCM)
Velocidades de interés para MS		3km/h, 30km/h, 120km/h, 350km/h
Potencia total transmitida por BS (Ptotal)		43dBm - 1.25, portadora 5MHz , 46dBm - 10MHz portadora
Clasificación potencias para MS		21dBm (125mW). 24dBm (250mW)
Modelo de interferencias entre celdas		UL: Modelo explícito (todas las celdas estan ocupadas) DL: Modelo explícito
BS estan en el medio del hexágono		
Usuarios se distribuyen uniformemente		
Distancia mínima entre el usuario u la celda		$\geq 35\text{m}$

Tabla 3.4 Parámetros para simulación de sistema Micro-cell en un sistema MIMO.

Parametro		Asunción	
		Outdoor a indoor	Out-door a outdoor
Sistema celular		Grid hexagonal, 19 celdas, 1 sector por celda	
Distancia entre celdas (ISD)		Ver 3.1.1-2	
Path loss dependiente de la distancia		$L[dB] = 7 + 56 \log_{10}(d[m])$	$L[dB] = \begin{cases} 39 + 20 \log_{10}(d[m]) & 10m < d \leq 45m \\ -39 + 67 \log_{10}(d[m]) & d > 45m \end{cases}$
Desvanecimiento Lognormal		Similar a UMTS 30.03, B 1.41.4	
Desviación típica de desvanecimiento		10 B	10dB
Correlación en la distancia del desvanecimiento		10 m	25 m
Correlación de desvanecimiento	Entre celdas	0.0	
	Entre sectores	Na	
Pérdidas de penetración		Incluidas en el Modelo de o de path loss dependiente de la distancia	
Diagrama de radiación de la Antena (horizontal) (Para Antenas omnidireccionales con diagrama de radiación fijo)		$A(\theta)=1$	
Frecuencia central		CF= 2GHz	
Modelo de canal		De a cuerdo con Tabla 3.2	
Velocidad de interés de MS		3km/h	3km/h, 30km/h
Total BS TX potencia (Ptotal)		38 dBm – 10MHz carrier	
UE potencias		21dBm (125mW). 24dBm (250mW)	
Modelo de interferencias entre celdas		UL: Modelo explícito (todas las celdas estan ocupadas) DL: Modelo explícito	
BS estan en el medio del hexágono			
Usuarios se distribuyen uniformemente			
Distancia mínima entre el usuario u la celda		$\geq 10m$ (y unas pérdidas mínimas de -53dB) La distancia depende del path loss + shadow fading	

A continuación se aclaran algunos de los parámetros encontrados en las tablas anteriores.

3.2.2 Modelo de canal

En el estándar especificado refleja varios modelos de canal. El primero, es un modelo multi-path más sencillo que se utilizó para las primeras simulaciones de este protocolo y que generalmente se utiliza para obtener resultados rápidos del comportamiento MIMO en comunicaciones móviles.

Tabla 3.5 – Modelo de canal para primeras simulaciones

Modelo Canal	Asunciones
Modelo de canal para las primeras simulaciones	Urbano típico (TU) para Micro, Macro cell
Modelo de canal para las primeras simulaciones	Multi-Antena Nivel de enlace (sección 3.3)



El segundo modelo y aquel que se utilizará en este proyecto, es el modelo SCM, descrito en apartados anteriores. En este caso estamos ante un modelo más complejo pero más preciso a la hora de obtener resultados. Además tiene una ventaja ante otros canales multipath, que es la posibilidad de utilizar más de una portadora.

La única aclaración que se puede destacar aquí es que hasta ahora este modelo de canal se ha utilizado para anchos de banda alrededor de 5 MHz. En un futuro se pretende usar para anchos de bandas mayores.

3.3 Escenarios específicos

Para culminar este apartado, comentaremos los parámetros específicos utilizados para la obtención de los resultados. Han influido tanto en la caracterización del escenario completo y están influidos por las características básicas necesarias para la simulación en LTE y comentadas en el apartado 3.2.

Uno de los objetivos en este documento, además de obtener resultados del comportamiento del SCM, es poder compararlo con simulaciones realizadas anteriormente con un modelo de canal diferente. Por ello, para calcular los parámetros básicos y adaptarlos a las características de nuestro canal, partimos de lo siguiente [5],[6] y [7]:

- $PL = -134$ dB
- $F = 5$ dB
- $ISD = 1600$ metros
- Potencia transmitida = 10 W

Notar que la figura de ruido (F), indica el ruido que hay en el transmisor debido a la temperatura que se genera en la antena. El ISD es la distancia máxima, en este caso es el bode de la celda del hexágono. Con estos valores se consigue una señal a ruido de 18 dB dentro de las características del canal a comparar.

La señal a ruido es un parámetro que indica el nivel de señal que existe en el sistema en comparación con el ruido generado. Se define como la relación de potencia recibida entre el ruido en el transmisor.

Para calcular esta relación ha de realizarse los siguientes cálculos:



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

$$SNR = \frac{Pr_{ecibida}}{No} \quad (3.1)$$

El ruido se calcula:

$$No = F + 10 * \log_{10}(BW) + 10 \log_{10}(T) + 10 * \log_{10}(k) \quad (3.2)$$

Y para calcular la potencia recibida hay que hacer un balance de enlace, teniendo en cuenta la potencia transmitida y las pérdidas.

$$Pr_{ecibida} = P_{transmitida} - L_{parhloss} + G_{tx} \quad (3.3)$$

Si ponemos todo en dB's se puede resumir la fórmula de la relación SNR a:

$$SNR = Pr_{ecibida}(dB) - L_{pathloss} + G_{rx} - No \quad (3.4)$$

En el proyecto presente se ha utilizado como parámetro base una potencia transmitida de 10 y una frecuencia de 2 MHz. Debido a las características utilizadas de path loss, en nuestro caso se ha puesto una ISD de 500 metros. La ganancia de la antena recibida es de 10.3 dB.

Concretamente, la fórmula de path loss utilizada en las simulaciones de este proyecto es la que se utiliza para entornos macro urbanos, como ya se analizó en el apartado 2.

$$PL = 34.5 + 35 \log_{10}(d) \quad (3.5)$$

Por lo tanto, realizando los debidos cálculos tenemos que la relación señal a ruido utilizada en este caso es:

$$SNR = 20dB$$



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

4. Comprobaciones previas

Para realizar las simulaciones ha habido que realizar una serie de comprobaciones previas. El objetivo es aclarar que la manera de generar los canales es la correcta y de concretar la metodología seguida a lo largo del proyecto, ya que la manera existían varias posibilidades

Además, en el segundo apartado se comprueba que el canal SCM actúa de forma coherentemente. Para ello se han realizado unas simulaciones intentando comprobar que se crean canales con fundamento.

4.1 Influencia entre estaciones base

Antes de comenzar a simular los diferentes canales y calcular las tasas a través de los algoritmos de coordinación de estaciones base, algunas comprobaciones dignas de destacar son comentadas en este apartado.

Para generar los canales se podían elegir diferentes caminos. Uno de ellos era utilizar la configuración concéntrica para calcular los parámetros de los usuarios y no solo utilizarla para la elección del usuario más cercano, si no ir calculando pequeños canales, hasta haber obtenido la matriz total. En este caso solo influyen 19 celdas alrededor de la principal y los demás valores se pondrían directamente a cero, asumiendo que la influencia es tan pequeña que no es necesaria ponerla.

La otra opción y la elegida, es utilizar las celdas concéntricas para calcular los parámetros y elegir que usuarios se asignan a cada estación base. Una vez conseguidas las coordenadas, directamente calcular el canal total con estos parámetros en el SCM.

Para realizar esta elección había que comprobar que aunque se calculara la matriz de canal con todas las estaciones bases a la vez, la tendencia es que a cada estación base le influyan las 19 estaciones de alrededor.

Las figuras que se muestran a continuación son la muestra de ello. La primera es la matriz de canal calculada con la opción descartada y la segunda figura representa la opción elegida a lo largo del proyecto. Aclarar que en estas figuras se representa una fila de la matriz de canal.

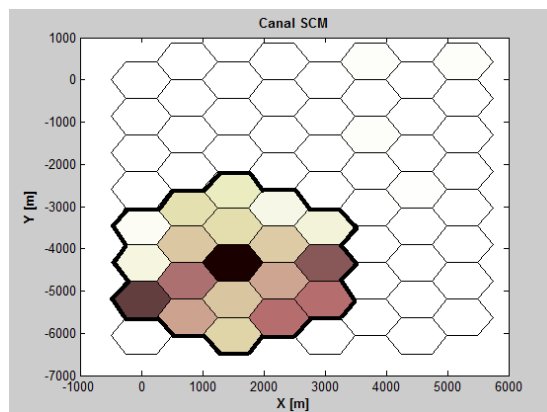


Figura 4.1 Matriz generada con canales de 19x19

Como se puede ver, solo influyen las diecinueve celdas que hemos incluido en la generación del canal. Los demás valores de la matriz están a cero, por lo que en la representación son hexágonos en blanco.

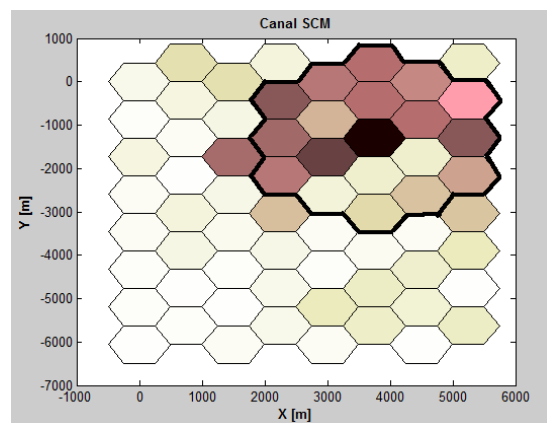


Figura 4.2 Matriz generada con canales 64x64

En la figura mostrada, se genera el canal directamente asignando las coordenadas de los sesenta y cuatro usuarios y estaciones base. Se observa que no son exactamente diecinueve celdas influyentes, pero el valor es aproximado. Además, conforme la celda está más lejos de la principal, se aprecia que la potencia es mucho menor.

Notar que en la representación de la matriz los colores representan diferentes niveles de potencia recibida, siendo los colores más oscuros los de mayor potencia. Además aclarar que cada color no es un valor concreto de potencia, si no que representa un rango.

4.2 Path loss de la Matriz de canal

En las primeras simulaciones del proyecto, hasta que se decidió que parámetros en cuanto a la ganancia de la antena, la distancia entre estaciones bases y la potencia transmitida. Había que ir comprobando si el Path loss que generaba nuestro canal era el correcto o el que realmente se necesitaba para conseguir una relación señal a ruido coherente.

Aunque el factor del cálculo del Path loss en este proyecto no es 2, se han utilizado principalmente estas fórmulas para ir observando el comportamiento de este parámetro. Una vez decididos los demás parámetros se realizó la comprobación dentro de cada simulación y con la fórmula exacta.

Las fórmulas que normalmente se utilizan para calcular el Path loss cuando se aproximan a un factor de 2 es:

$$PL = -10 * \log_{10}(|H|^2) \quad [\text{dB}] \quad (4.1)$$

4.3 Comportamiento canal con separación de antenas en 1x1

Se muestra los resultados obtenidos cuando estamos ante separación de antenas en transmisión con 1x1 antenas. Para esta configuración no tiene sentido la separación entre antenas ya que al haber una antena en ambos elementos de transmisión no hay ningún tipo de separación. Pero se muestran los resultados para que se vea que el canal actúa coherentemente.

Los valores obtenidos en las simulaciones son los siguientes:

Tabla 4.1 Resultados comprobación previa separación antenas

DIFERENTES SEPARACIONES ANTENAS RX	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_1x1 SNR=20 lambda=0.25	3,33	9,36	2,96
Rk_cvx_1x1 SNR=20 lambda=0.5	3,48	9,86	3,07
Rk_cvx_1x1 SNR=20 lambda=1	3,31	9,05	2,90
Rk_cvx_1x1 SNR=20 lambda=2	3,14	9,84	2,78

Para estas tres medidas estadísticas elegidas como referencia, se aprecia que son todos valores muy parecidos. No superando valores máximos de 10 bps/Hz y una media de 3,3 bps/Hz.

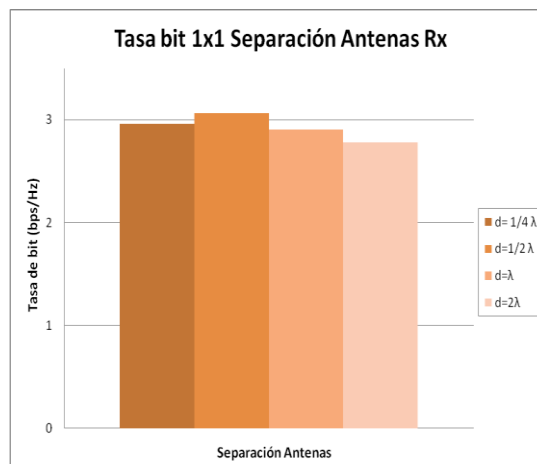


Figura 4.3 Tasa convex separación antenas Rx 1x1

Como se puede ver en la figura, las tasas que aparecen son muy parecidas. De hecho el efecto decreciente de la gráfica es pura casualidad, ya que es producido por la aleatoriedad de las simulaciones.

5. Resultados

Comenzamos con el apartado donde se muestran los resultados obtenidos a lo largo del proyecto y con el que se pueden sacar las conclusiones definitivas del análisis en el que nos encontramos.

En los apartados posteriores se pasa a analizar los resultados tanto numéricamente como gráficamente de las diferentes simulaciones propuestas. Aclarar que se muestran en todos los apartados dos tipos de gráficas. Las primeras figuras muestran la tasa de bit para los diferentes algoritmos de coordinación de estaciones base, utilizados en el análisis.

Además se tiene una gráfica que representa las medianas para el algoritmo convex, explicado en la sección 2.3, que es algoritmo más óptimo de los utilizados en el proyecto.

5.1 Resultados dependiendo del tamaño del escenario

A priori, el tamaño del escenario no tendría por qué ser un elemento que diferencie las simulaciones realizadas. Ya que, a pesar de tener en unos escenarios más estaciones bases y usuarios que en los otros, generando por lo tanto mayor interferencia, no debería notarse ya que los algoritmos de coordinación de estaciones bases anulan dicha interferencia.

Según las simulaciones realizadas, los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación

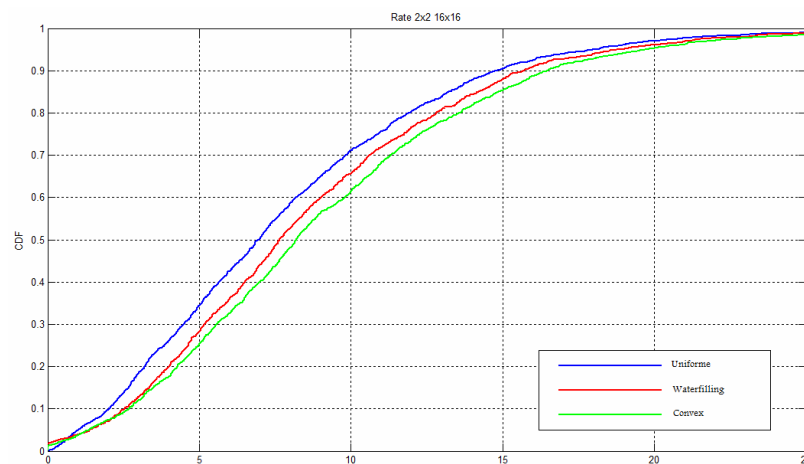


Figura 5.1 CDF por BS para 16x16

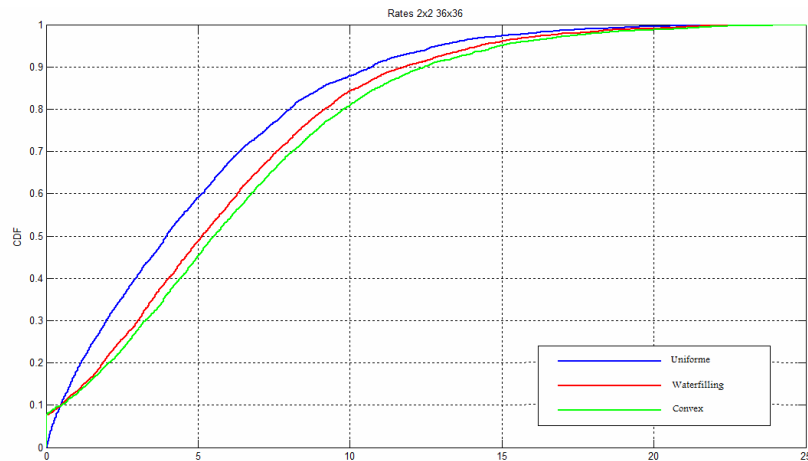


Figura 5.2 CDF por BS para 36x36

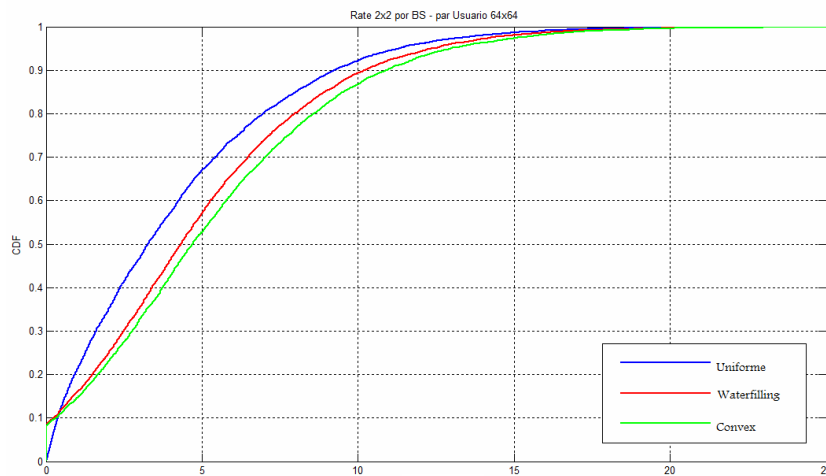


Figura 5.3 CDF por BS para 64x64

A pesar de lo que se creía, la variación de la tasa entre un escenario a otro es notable. Conforme aumenta el número de estaciones bases en el sistema, y por lo tanto el número de usuarios, nos encontramos con que la tasa disminuye. Los valores exactos de las medianas se muestran a continuación.

Tabla 5.1 Resultados medianas de tasas para diferentes tamaños de escenarios

DIFERENTES ESCENARIOS	Medianas (bps/Hz)		
	64x64	36x36	16x16
Rk_cvx_1x1 SNR=20 lambda=0.5	9,86	10,90	12,61
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.5	11,72	12,80	17,61
Rk_cvx_4x4 SNR=20 lambda=0.5	16,53	21,90	30,20

Como se puede observar, si el escenario se divide entre cuatro, la tasa llega a aumentar hasta casi un 50% para el caso de 4x4. En las otras configuraciones también se nota la diferencia en el tamaño del escenario.

Una explicación a estos resultados es que al haber más estaciones bases, estamos las pérdidas por las distancias son mayores y aunque teóricamente solo nos influyen diecinueve celdas de alrededor, ya se ha comprobado que de alguna manera sí están influyendo, aunque en pequeña proporción.

5.2 Resultados dependiendo del número de elementos del array de antenas

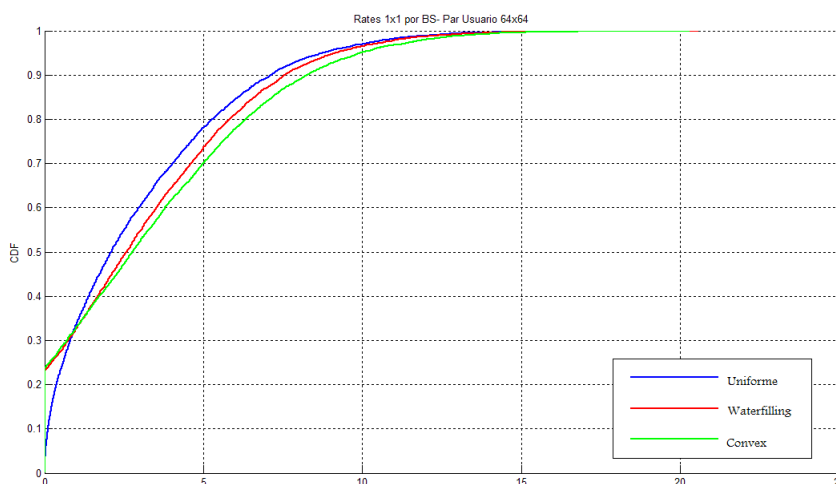
A continuación se analiza la tasa de bit dependiendo del número de antenas utilizado tanto en recepción como en transmisión. La configuración del resto de parámetros es la configuración genérica utilizada en este proyecto:

- Antena Omnidireccional
- Potencia de 10 W
- Separación de antenas $\lambda/2$
- Tamaño del escenario 64x64

Los resultados obtenidos para los diferentes algoritmos usados se muestran a continuación. Hay tres gráficas diferentes, ya que están separadas las tres configuraciones utilizadas.

5.2.1 Resultados dependiendo del número de antenas por estación base

Esta primera figura muestra la CDF de la tasa por estación base para la configuración de 1x1. Se observa que dependiendo del algoritmo utilizado, los resultados son diferentes. El algoritmo más óptimo es el convex con el que se puede obtener una tasa de 8 bps/Hz para el 10 % de los casos.



Para la configuración de 2x2, es decir el sistema tiene dos antenas de transmisión y otras dos en recepción. Tenemos la siguiente función acumulada.

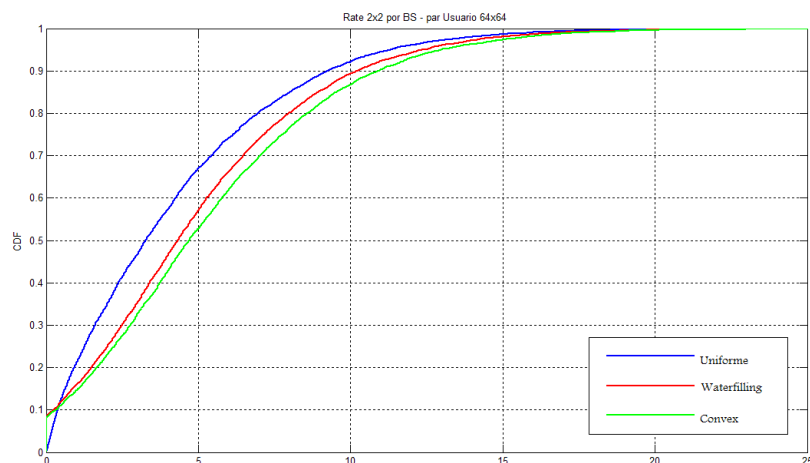


Figura 5.5 CDF por BS 2x2 con diferentes algoritmos

Comparándolo con el caso anterior, la tasa ha aumentado considerablemente. Introduciendo una antena en cada elemento de transmisión conseguimos tasas mayores a las que teníamos anteriormente, configuración utilizada en GSM y UMTS. El siguiente caso es la configuración 4x4, según esta tendencia deberían salir tasas mayores aún.

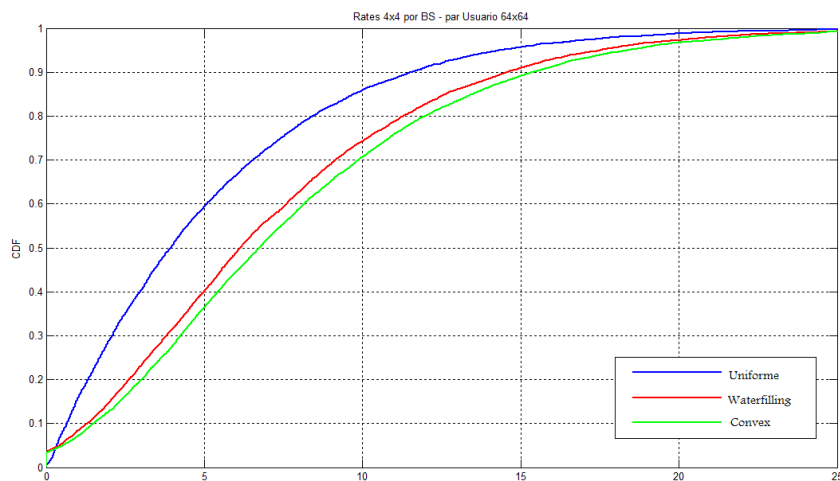


Figura 5.6 CDF por BS 4x4 con diferentes algoritmos

Como habíamos anticipado salen valores mayores que en los casos anteriores. De hecho el 10 % de los valores están por encima de 15 bps/Hz, aproximadamente el doble que en el caso de 1x1.

Los resultados numéricos obtenidos en valores de media, mediana y máximo son los siguientes.

Tabla 5.2 Resultados tasas diferentes configuraciones

DIFERENTES COMBINACIONES ANTENAS	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_1x1 SNR=20 lambda=0.5	3,48	9,86	3,07
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.5	5,36	11,72	4,92
Rk_cvx_4x4 SNR=20 lambda=0.5	7,78	16,53	7,36

La gráfica mostrada representa los valores de las medianas de la tabla anterior.

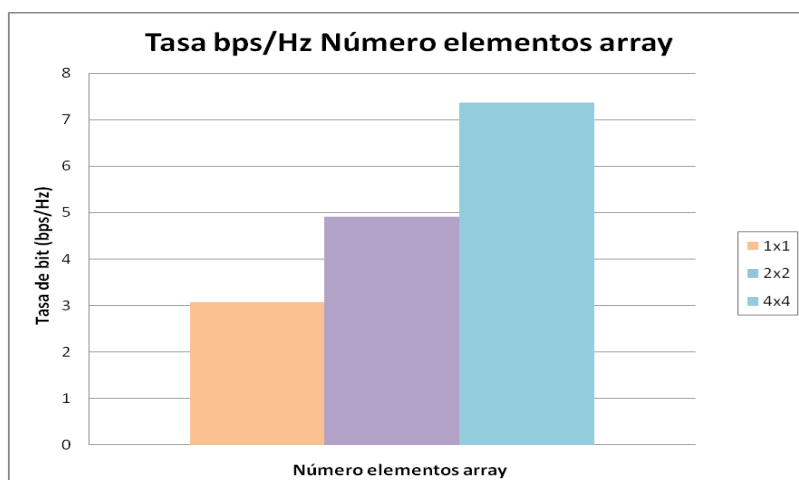


Figura 5.7 Tasas convex dependiendo número de elementos array

Se aprecia claramente que conforme aumentamos el número de antenas tanto en el transmisor como en el receptor, la tasa conseguida tiende a crecer. Los valores de mediana representados, son valores de la mediana de las medias de las diferentes simulaciones.

5.3 Resultados dependiendo de la potencia

En este caso se han utilizado tres valores de potencia diferentes para una única configuración de antenas. Ya que el comportamiento del aumento de la potencia en transmisión es idéntico para diferentes números de antenas tanto en recepción como en transmisión.

Como en ocasiones anteriores, los demás parámetros se han dejado como estaban, exceptuando la separación entre antenas, que en este caso es $\lambda/4$. Es decir, tenemos:

- Antena Omnidireccional
- Separación de antenas $\lambda/4$
- Tamaño del escenario 64x64

Los valores de potencia elegidos son 5 W, 10 W y 15 W. Para el primer valor, el equivalente en dBWs sería restar 3 dBW al caso que utilizamos como referencia, 10W (10 dBW). Además es equivalente a restar esta cantidad a la relación señal a ruido. Para el segundo caso, se sumarían 1,76 dBW.

Para un valor de potencia transmitida de 5 W, la gráfica del valor acumulado de la tasa por estación base es la siguiente.

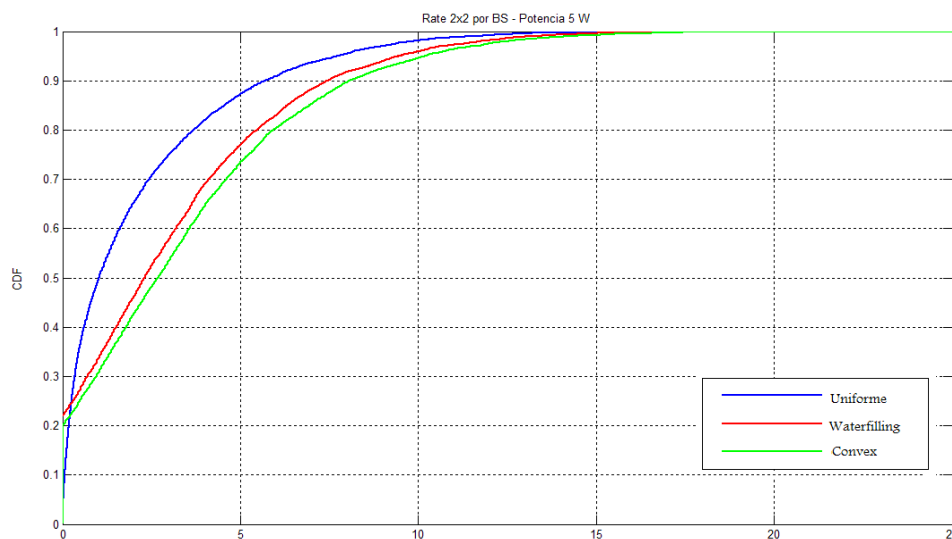


Figura 5.8 CDF 2x2 para potencia 5W

Antes de comentar las diferencias del comportamiento con los otros valores de potencia, se muestran las otras dos gráficas para tener una referencia más clara de la comparación. La siguiente gráfica es para un valor de potencia de 10 W.

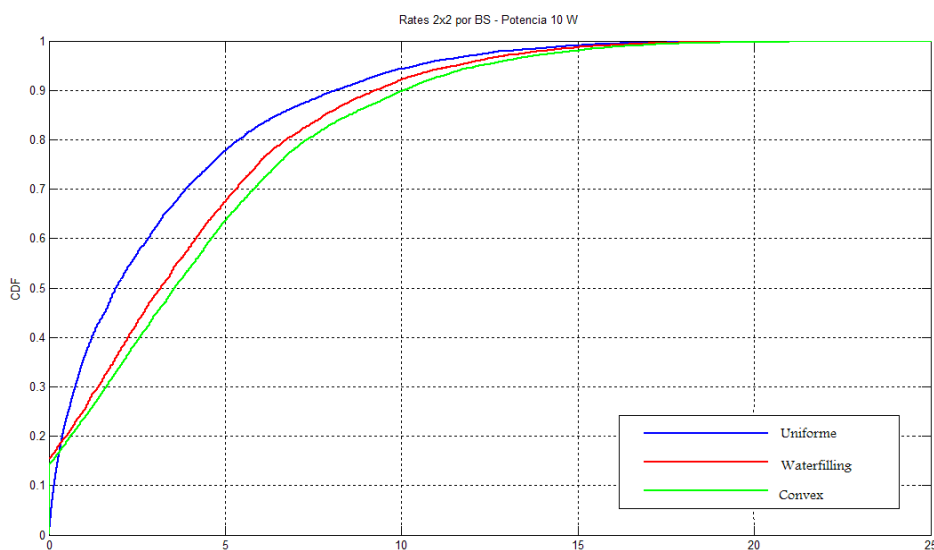


Figura 5.9 CDF 2x2 para potencia 10W

La última gráfica es la que representa la tasa alcanzada por las estaciones base para una potencia de 15 W.

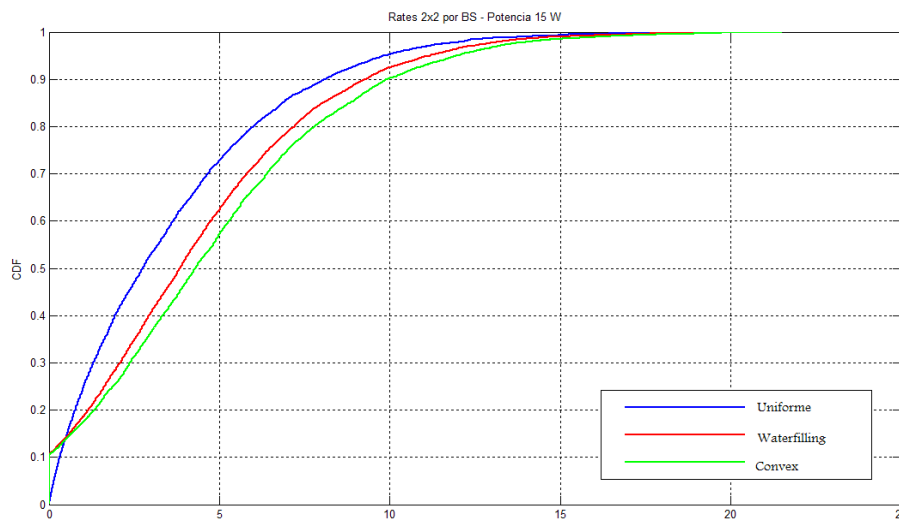


Figura 5.10 CDF 2x2 para potencia 15W

En las gráficas mostradas no se aprecia claramente las diferencias entre los distintos valores. La tabla realizada tiene los valores de los tres términos estadísticos usados en este apartado de resultados, donde se aprecian mejor las diferencias.

Tabla 5.3 Resultados medianas de tasas para diferentes potencias

DIFERENTES POTENCIAS	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_2x2 SNR=17 lambda=0.25 Pot 5W	3,42	9,33	3,10
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.25 Pot 10W	4,39	10,91	3,91
Rk_cvx_2x2 SNR=21,7 lambda=0.25 Pot 15W	4,83	10,77	4,39

Los valores que aparecen en la tabla con para el algoritmo de coordinación de estaciones base más óptimo. En las figuras anteriores se representa con el color verde y es el convex. Claramente se ve que una tendencia creciente en los valores de la tasa al aumentar la potencia, algo que se esperaba desde el principio.

Hay un valor atípico en estos datos, que es el valor máximo para la potencia de 15 W, ya que según la tendencia, debería ser mayor que para el caso de una potencia de 10 W. Esto es debido a que las simulaciones tienen una componente aleatoria muy alta, por lo que el valor máximo coincidió en ese caso que salía menor. Pero los valores más significativos son la media y la mediana.

Para ver gráficamente esta tendencia creciente de la tasa de transmisión por estación base, conforme se aumenta la potencia transmitida. Se representa el valor de la mediana para los diferentes casos.

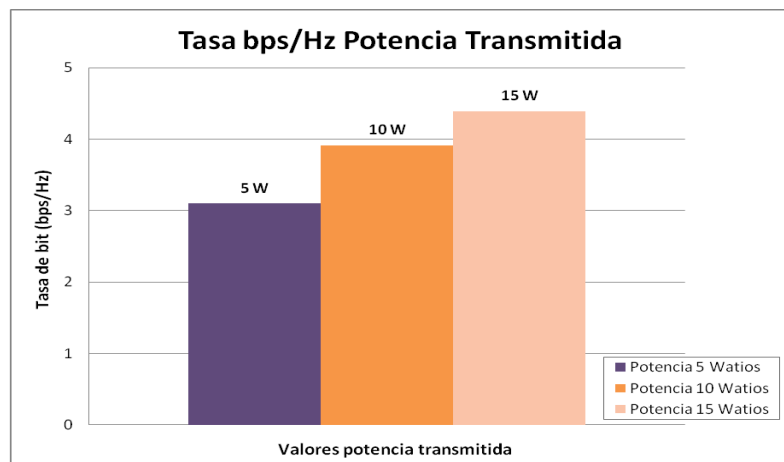


Figura 5.11 Tasa algoritmo convex diferentes potencias

Para el segundo caso, se puede ver que la tasa incrementa pero más o menos la mitad al caso anterior. Esto es debido a lo que hemos comentado anteriormente, el incremento de 5W a 10 W suponen 3dBW de potencia, pero el incremento de 10W a 15W son 1,76 dBW.

Como conclusión final de este apartado se puede decir que como es lógico, conforme la potencia transmitida la tasa por estación base es mayor. Pero en la práctica hay que llegar a un compromiso con la tasa obtenida y el ahorro de potencia.

5.4 Resultados dependiendo de la separación de elementos del array en transmisión

Las simulaciones realizadas en este apartado, se basan en comprobar si la separación entre las antenas del array en transmisión afecta y de qué forma a la tasa obtenida por estación base, que en este caso coincide con la obtenida por usuario.

Para ello hacemos diferentes simulaciones con las diferentes combinaciones de números de antenas y con diferentes separaciones entre las antenas.

Las separaciones utilizadas son las mismas que en el caso anterior:

- $d = \lambda/4$ m
- $d = \lambda/2$ m
- $d = \lambda$ m
- $d = 2\lambda$ m

Para entender este apartado y el siguiente mejor, en la sección 2 se habló acerca de la dependencia de la separación entre antenas y la correlación entre

las señales. Se vuelve a mostrar dicha gráfica, que servirá de apoyo en las posteriores explicaciones a los resultados obtenidos.

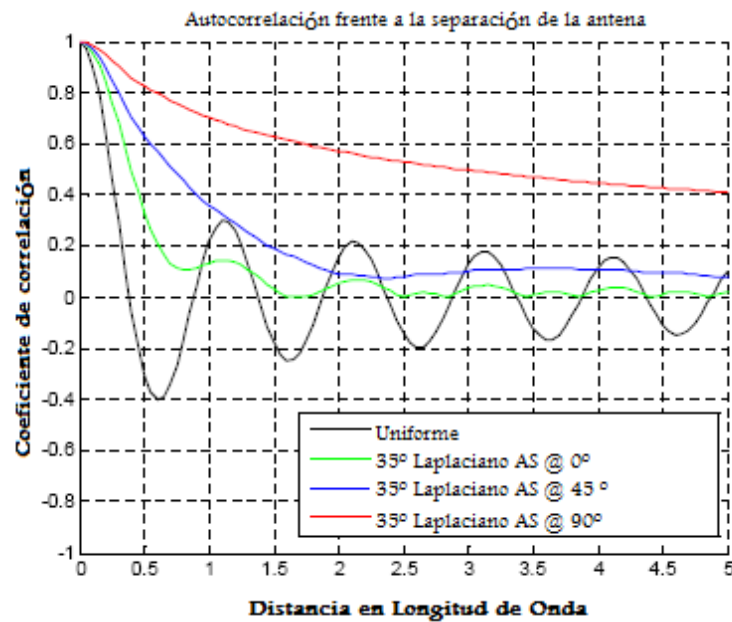


Figura 5.11 Dependencia correlación frente a la longitud de onda

5.4.1 Configuración 2x2 con separación antenas en transmisión

Debido a que hay dos antenas en cada elemento del sistema de comunicación aquí si podemos apreciar realmente el efecto de la separación entre ellas.

Las primeras gráficas muestran el comportamiento de los diferentes algoritmos de coordinación de estaciones bases conforme vamos aumentando la separación entre las antenas.

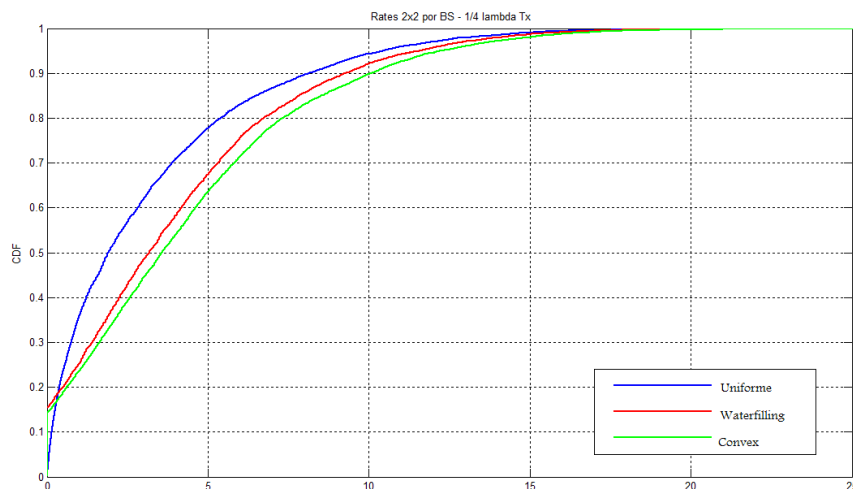


Figura 5.12 CDF $d = \lambda/4$ en transmisión 2x2

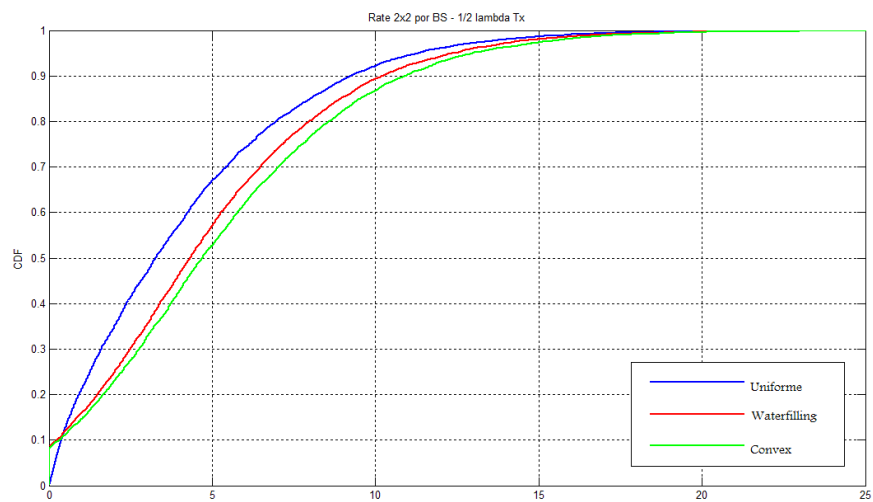


Figura 5.13 CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 2x2

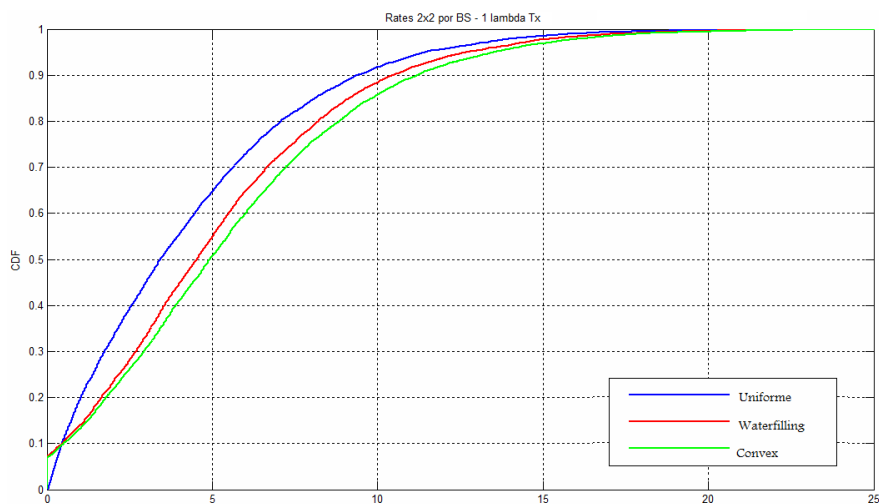


Figura 5.14 CDF $d=\lambda$ antenas en transmisión 2x2

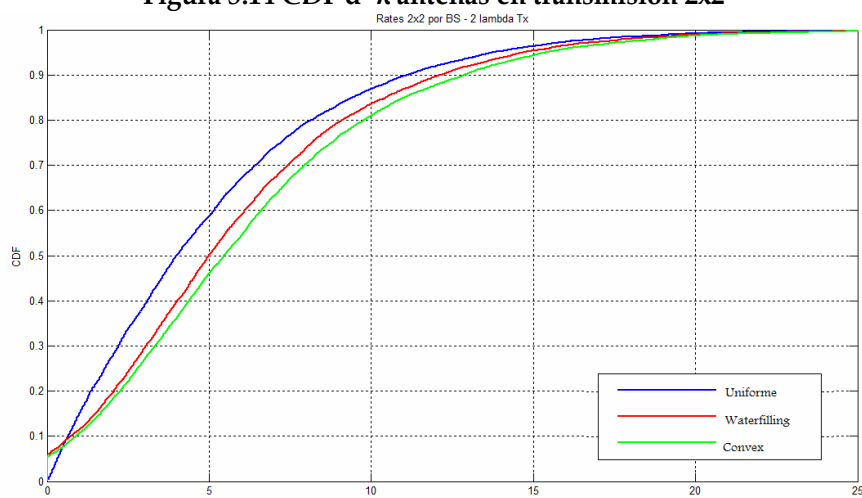


Figura 5.15 CDF $d=2\lambda$ antenas en transmisión 2x2

El comportamiento de los tres algoritmos es idéntico, conforme aumenta la separación entre antenas, la tasa por estación base es mayor, ya que disminuye la correlación entre las señales.

Concretamente en un entorno urbano en transmisión, según la gráfica donde se definen los parámetros del entorno en el capítulo 2, el ángulo spread es de 5° . En la gráfica mostrada, aparecen diferentes valores para el ángulo de llegada, que en el SCM es un parámetro aleatorio. Por lo tanto el comportamiento de nuestras gráficas oscilará entre esas tres representaciones.

Se concretan los resultados con los valores exactos para el algoritmo ya estudiado en apartados anteriores, el convex. Además de adjuntar un diagrama de barras que representa el comportamiento para la configuración de 2x2.

Tabla 5.4 Resultados tasas diferentes separación antenas transmisión 2x2

DIFERENTES SEPARACIONES ANTENAS TX	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.25	4,39	10,91	3,91
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.5	5,36	11,72	4,92
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=1	5,58	12,39	5,08
Rk_cvx_2x2SNR=20 lambda=2	6,32	14,39	5,76

En este caso tenemos una evolución claramente creciente, el motivo de ello es que al haber mayor separación entre las antenas, tenemos una menor correlación entre las señales transmitidas por cada antena. Esto es debido a que el ángulo spread es muy pequeño, es decir, nos llegan rayos desde muy poco sitios, por lo tanto el separar las antenas se nota mucho más que en recepción, como veremos posteriormente.

Al disminuir la correlación, se envía más información diferente y esto ayuda en el receptor a detectar mucho mejor la señal enviada originalmente. Por lo que se consiguen tasas mayores.

Cualquiera de las tres representaciones en la gráfica mostrada al inicio de este apartado, podría explicar el comportamiento donde la correlación disminuye con la separación entre las antenas.

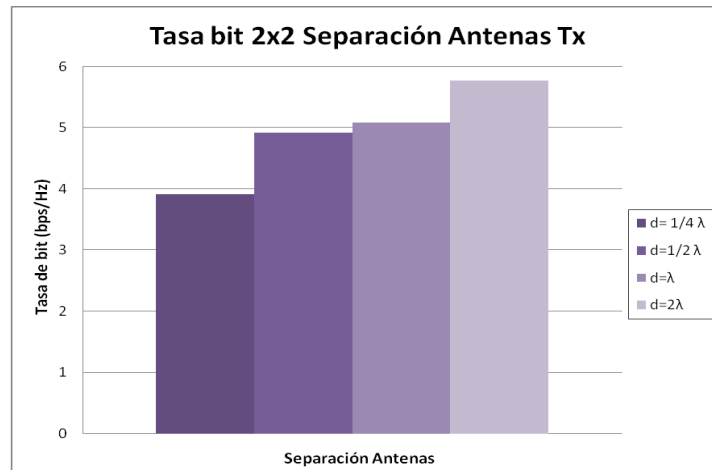


Figura 5.16 Resultados tasas separación antenas transmisión 2x2

La gráfica anterior solo sirve para aclarar los resultados visualmente. Cerciorando el comportamiento creciente de la tasa ante la separación de las antenas.

5.4.1 Configuración 4x4 con separación antenas en Transmisión

Además de realizar la simulación para la configuración de 2x2, se ha realizado aumentado en dos el número de antenas en cada elemento. Se muestran en primer lugar las gráficas donde se representan la función acumulada para cada caso.

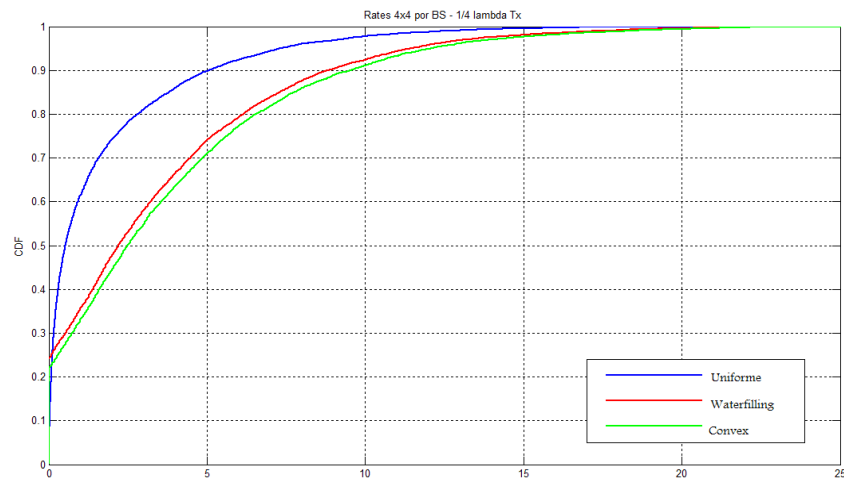


Figura 5.17 CDF $d=\lambda/4$ antenas en transmisión 4x4

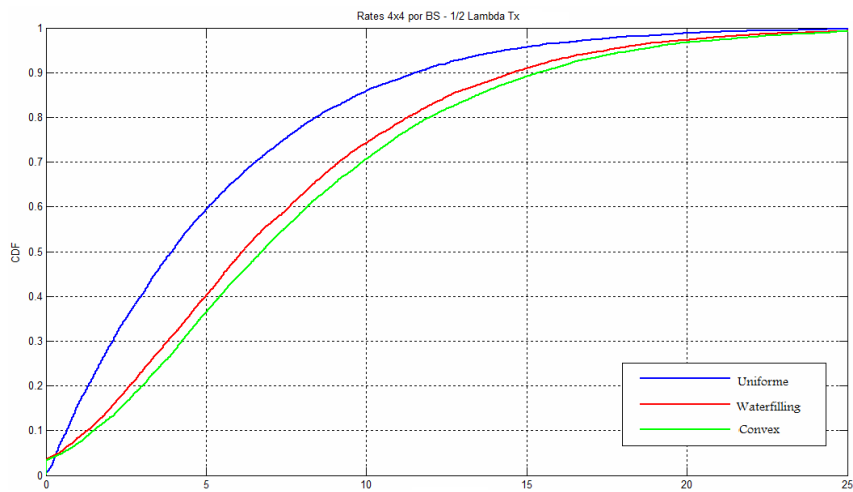


Figura 5.18 CDF $d=\lambda/2$ antenas en transmisión 4x4

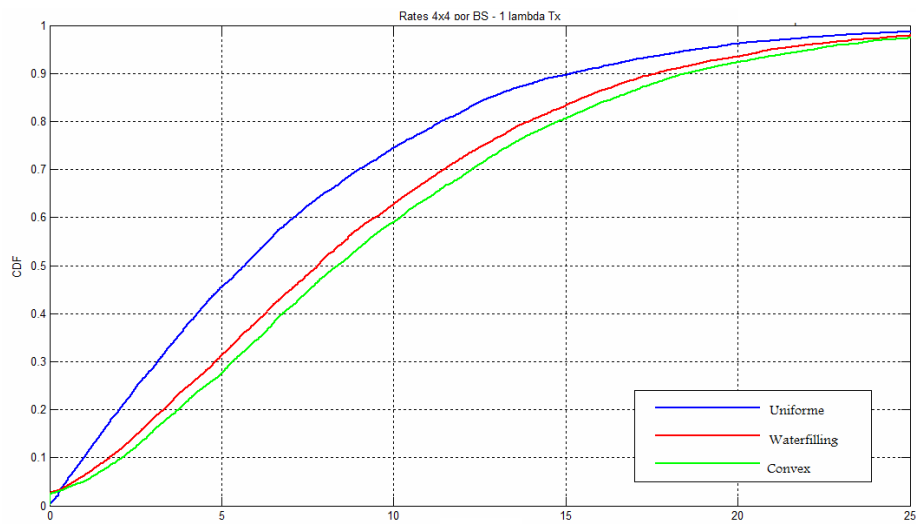


Figura 5.19 CDF $d=\lambda$ antenas en transmisión 4x4

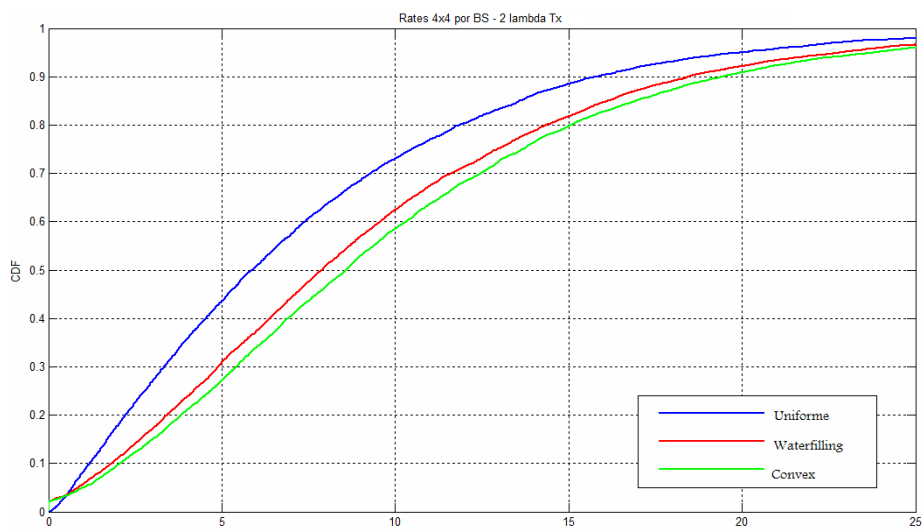


Figura 5.20 CDF $d=2\lambda$ antenas en transmisión 4x4

En estas gráficas se observa la misma tendencia que en el apartado anterior, al ir separando las antenas, la correlación entre las señales transmitidas disminuye, consiguiéndose así una tasa por estación base mayor.

Mirando la gráfica de la dependencia entre la correlación y la separación entre antenas, hay un límite en el que por más que separemos las antenas no se consigue disminuir la correlación.

Tabla 5.5 Resultados tasas para diferentes separaciones antenas transmisión 4x4

DIFERENTES SEPARACIONES ANTENAS TX	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=0.25	3,74	11,34	3,09
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=0.5	7,78	16,53	7,36
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=1	9,60	18,45	8,90
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=2	9,93	23,84	8,75

Si se representa los valores de la mediana para el caso de 4x4, se observar que el valor de la mediana cuando está separado dos lambdas es menos al anterior. De todas maneras, si miramos los valores de media y máximos la tendencia es creciente. Este valor en modo práctico no se puede considerar menor, debido a la aleatorización de las simulaciones.

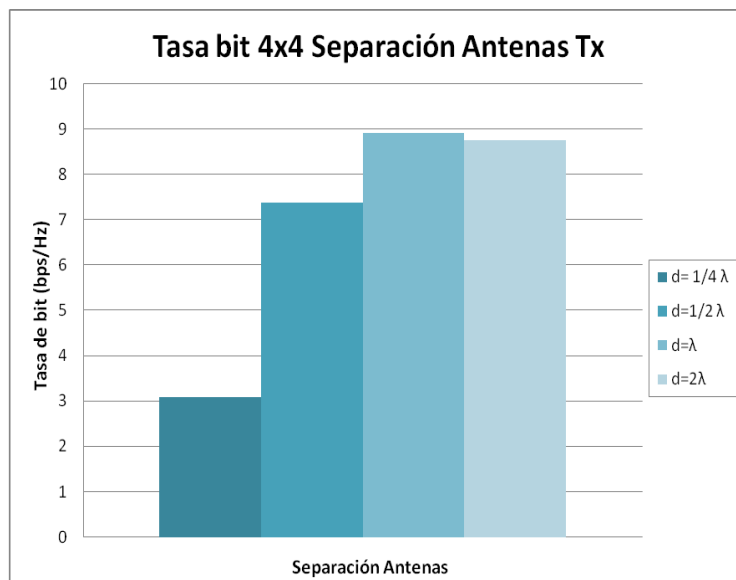


Figura 5.21 Resultados tasas separación antenas transmisión 4x4

Al final, tendrá que existir un compromiso entre la tasa conseguida por usuario y la separación entre antenas, ya que este parámetro tiene limitaciones físicas. Concretamente, en la parte de transmisión, la flexibilidad en la separación será mucho mayor que en la parte de recepción, ya que los equipos son mayores.

5.5 Resultados dependiendo de la separación de elementos del array en recepción.

Ahora se compara las diferentes separaciones de antenas para las distintas combinaciones. Este apartado está centrado en la separación de las antenas en recepción, pero posteriormente se analizará también la separación en transmisión. La recepción está referida a los terminales móviles, MS.

Como solo se aplica la separación entre antenas para la recepción, en la transmisión se deja la separación utilizada por defecto, es decir, $d = \lambda/2$ m. En recepción, las separaciones utilizadas son las siguientes:

- $d = \lambda/4$ m
- $d = \lambda/2$ m
- $d = \lambda$ m
- $d = 2\lambda$ m

En el apartado de comprobaciones previas se analizó el caso en el que se intenta la separación de antenas en 1x1, se intenta, ya que para este caso es físicamente imposible. Aquí se hace un análisis más detallado para el caso de 2x2 y 4x4, ya que es donde se aprecia la influencia de la separación de las antenas en recepción.

5.5.1 Configuración 2x2 con separación antenas en recepción

Se comprueba ahora si el comportamiento visto en los apartados anteriores ocurre de manera similar en la parte de recepción. En este caso el ángulo spread es mucho mayor que el utilizado en transmisión, por lo tanto es de esperar que las diferencias entre las diferentes separaciones sean menores.

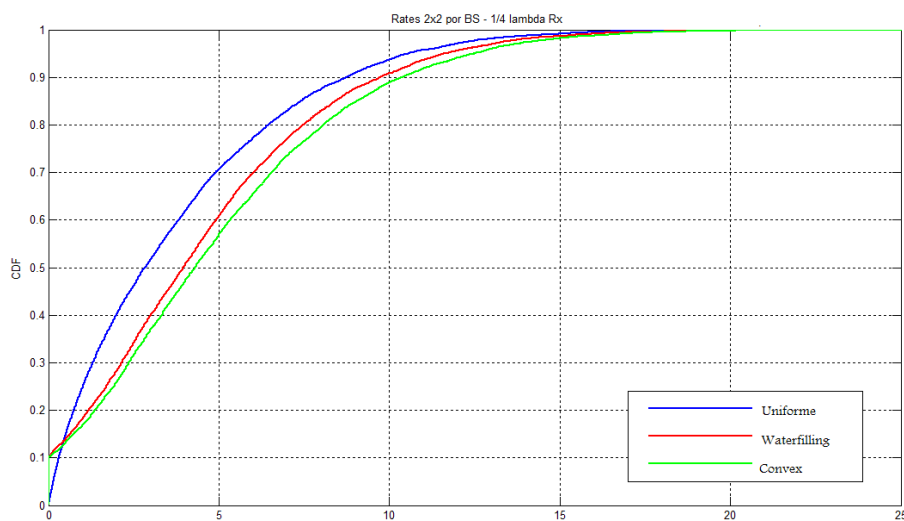


Figura 5.22 CDF $\lambda/4$ antenas en recepción 2x2

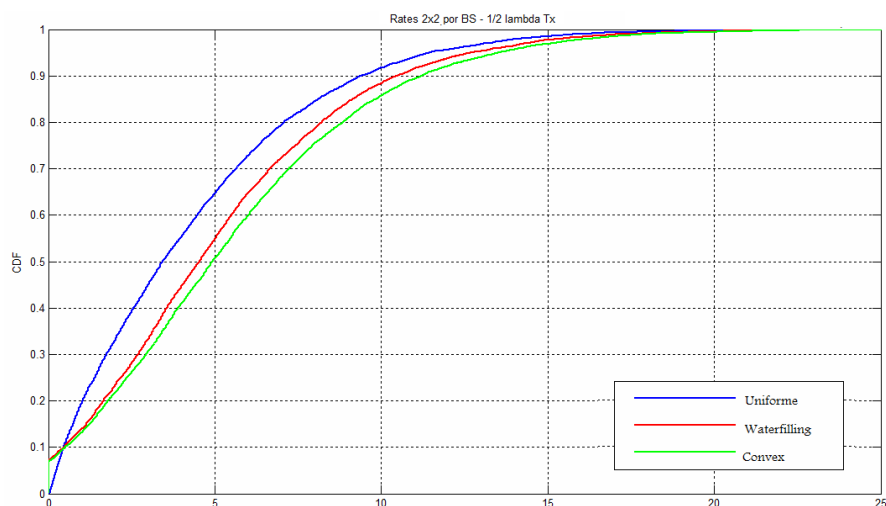


Figura 5.23 CDF $d=\lambda/2$ antenas en recepción 2x2

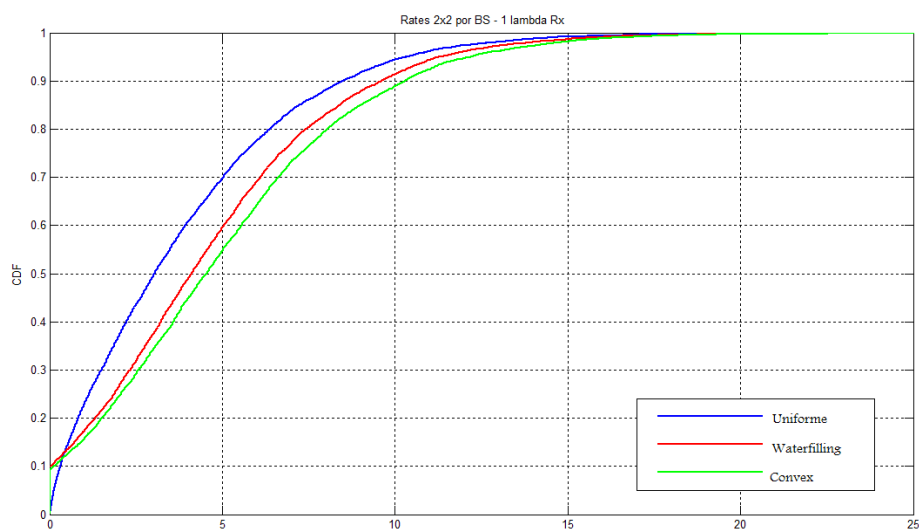


Figura 5.24 CDF $d=\lambda$ antenas en recepción 2x2

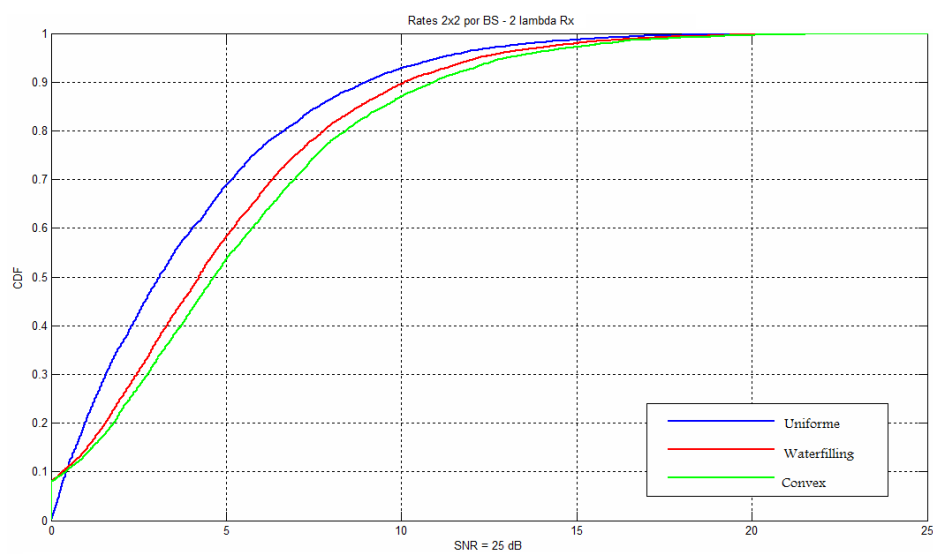


Figura 5.25 CDF $d=2\lambda$ antenas en recepción 2x2

A primera vista, en las gráficas anteriores no se aprecia las diferencias claramente, para ello se analiza los valores exactos en cada caso y así ver la tendencia que sigue la tasa cuando se separan las antenas en recepción.

Tabla 5.6 Resultados tasas diferente separación antenas recepción 2x2

DIFERENTES SEPARACIONES ANTENAS RX	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.25	4,95	11,01	4,69
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.5	5,36	11,72	4,92
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=1	5,06	11,71	4,66
Rk_cvx_2x2SNR=20 lambda=2	5,34	12,53	4,84

En este caso no hay una tendencia claramente creciente. Esto es porque si miramos la gráfica de la dependencia de la correlación con la separación entre antenas, el comportamiento depende del valor del ángulo de llegada. Al ser valores aleatorios, el comportamiento puede coincidir con cualquiera de las funciones representadas, en este caso ha coincidido que los valores de correlación son muy parecido y por lo tanto, los valores de las tasas también salen parecidos. Además influye que el ángulo spread para el caso de recepción es mayor-

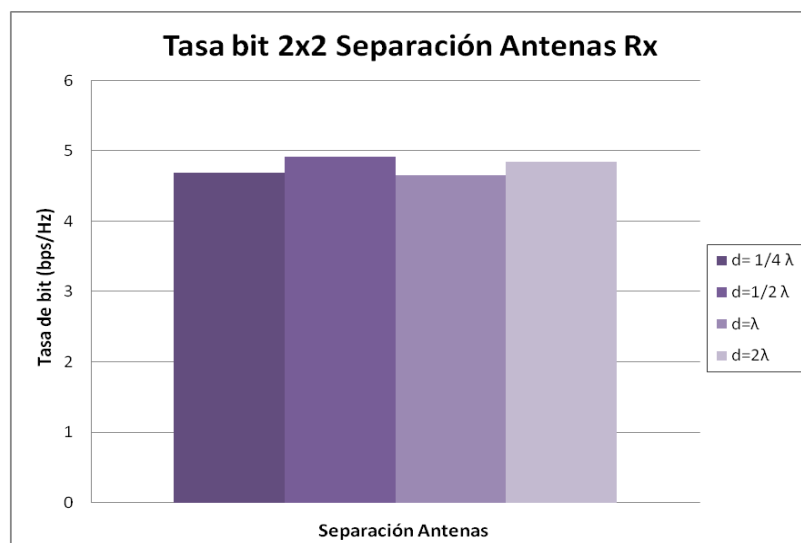


Figura 5.26 Resultados tasas separación antenas recepción 2x2

5.5.1 Configuración 4x4 con separación antenas en recepción

En el caso del receptor, la separación entre las antenas cuando estamos ante cuatro elementos está mucho más limitada. Ya que el tamaño del terminal es mucho menor y su tendencia es a reducirlo.

Se muestran las CDF calculadas con las simulaciones.

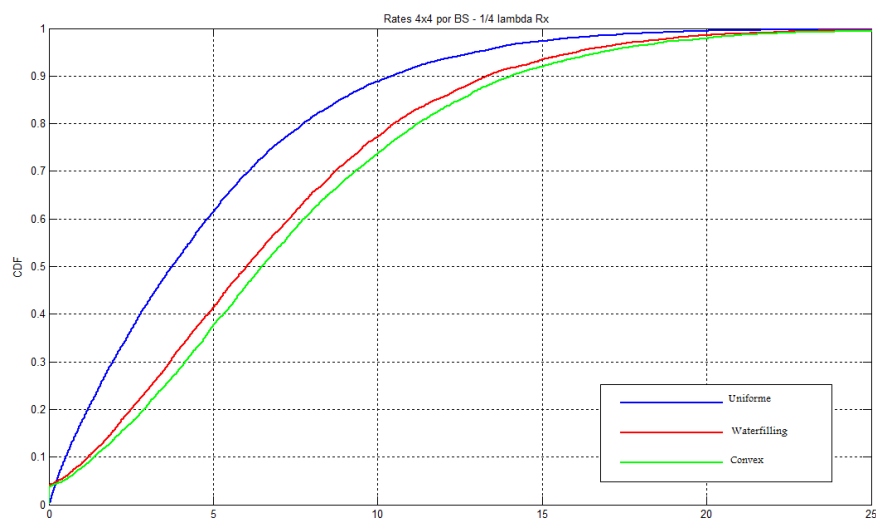


Figura 5.27 CDF $d=\lambda/4$ antenas en recepción 4x4

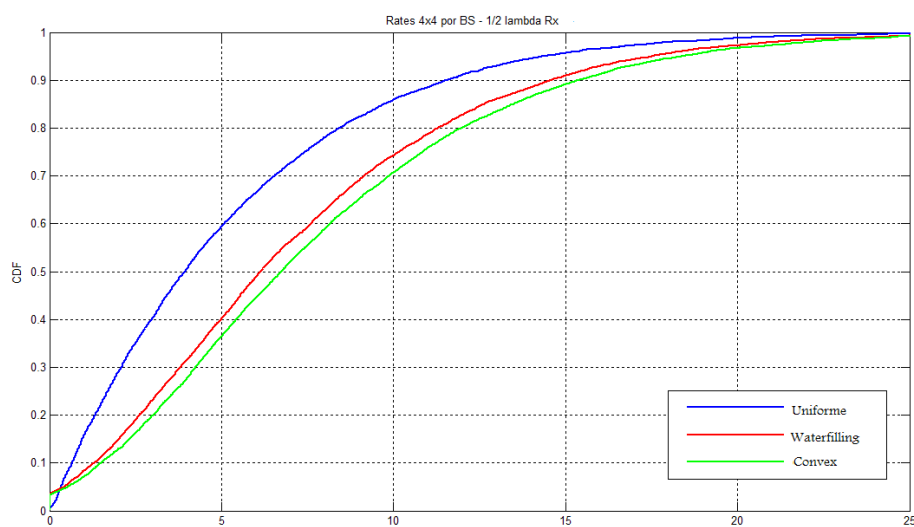


Figura 5.28 CDF diferentes $d=\lambda/2$ en recepción 4x4

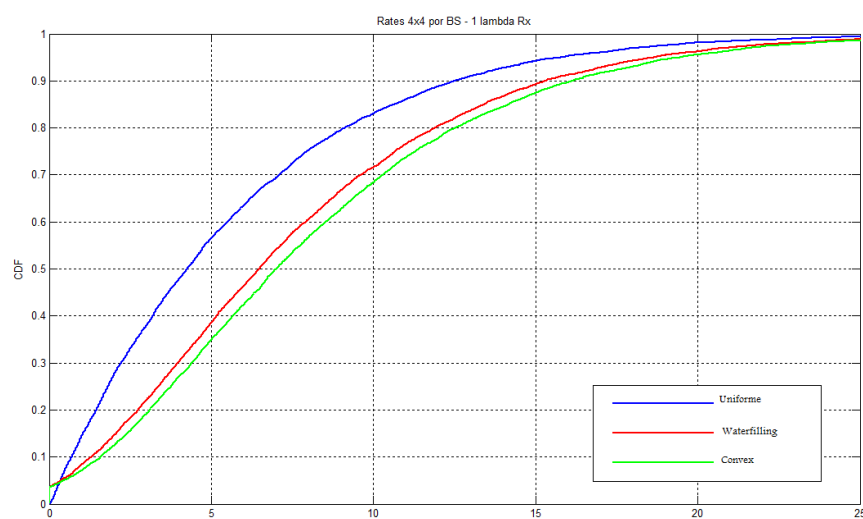


Figura 5.29 CDF diferentes $d=\lambda$ en recepción 4x4

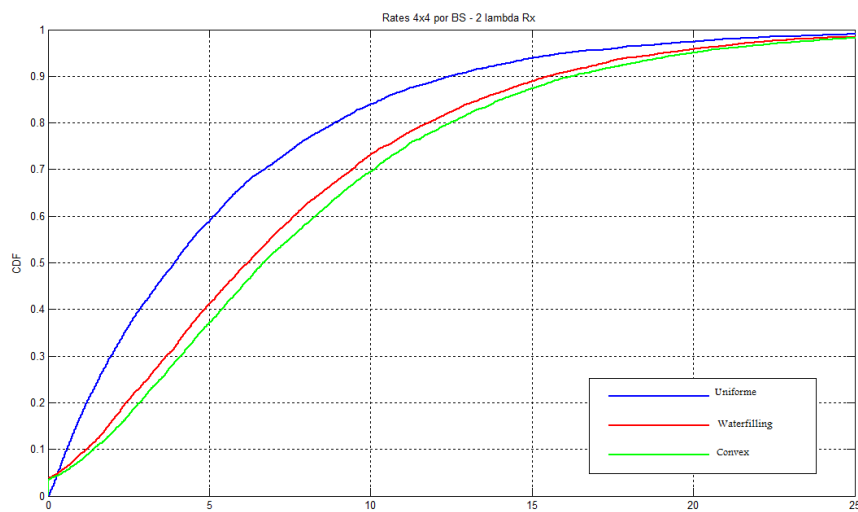


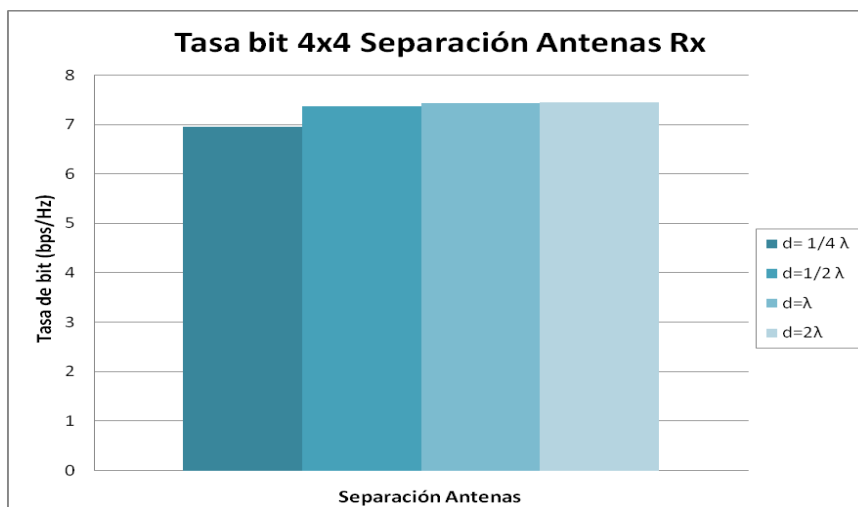
Figura 5.30 CDF $d=2\lambda$ en recepción 4x4

Como en el apartado anterior, no se aprecian muchas diferencias a primera vista entre una gráfica y otra. Pero se analizan los valores exactos para concluir el comportamiento de las mismas.

Tabla 5.7 Resultados tasas diferente separación antenas recepción 4x4

DIFERENTES SEPARACIONES ANTENAS RX	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=0.25	7,31	14,51	6,89
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=0.5	7,78	16,53	7,36
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=1	8,15	16,18	7,44
Rk_cvx_4X4 SNR=20 lambda=2	8,05	17,40	7,45

Tanto en los valores mostrados en la tabla, como en la representación de las medianas, se puede ver que llega un momento que por mucho que se separen las antenas, la correlación alcanza los mismo valores.



5.31 Resultados tasas separación antenas recepción 4x4



En este caso, mirando el compromiso del tamaño del terminal móvil y la separación entre antenas. Como se obtienen resultados muy parecidos, no quedaríamos con una separación de dos lambdas.

En recepción se aprecian que al separar las antenas se notan mucho menos las diferencias que en transmisión. Una explicación es que el ángulo de llegada en recepción es mayor, por eso, se nota mucho la diferencia en la primera separación pero después el comportamiento es similar llegando un límite en el que por mucho que se separe las antenas no decrementa la correlación.

5.6 Comparación entre diferentes canales

En este apartado se comparan las simulaciones realizadas con el canal SCM y otras realizadas con un modelo de canal mucho más sencillo. Las características a destacar de este modelo son:

- Pérdidas de camino : se modelan a través de la siguiente ecuación:

$$PL (dB) = 14.5*PL(do)+10* 3.8\log (ddo) \quad (5.1)$$

- La componente lenta de Shadow Fading, se modela a través de una Gaussiana: $N(0,8)$
- La componente de atenuación de pequeña escala Rayleigh se modela de la siguiente forma:

$$(N(0,1)+j N(0,1))/\sqrt{2} \quad (5.2)$$

Otras diferencias es que en el canal SCM se pueden jugar con los valores de las antenas, es decir, poder poner antenas con diferentes diagramas de radiación o poder realizar las separaciones entre antenas. Además, el SCM está preparado para usar seis portadoras diferentes, aunque en este proyecto solo se ha utilizado una.

Para poder compara ambos modelos de canal, se realiza la comparación con las simulaciones del canal SCM en el que la separación entre antenas es de media lambda. En cuanto al número de portadoras es uno en ambos casos y la señal a ruido son niveles comparables.

Los resultados obtenidos para el canal SCM y comentados en el apartado 5.2 se muestran en la tabla.

Tabla 5.8 Resultados tasas diferentes configuraciones

DIFERENTES COMBINACIONES ANTENAS	Medias (bps/Hz)	Max (bps/Hz)	Medianas (bps/Hz)
Rk_cvx_1x1 SNR=20 lambda=0.5	3,48	9,86	3,07
Rk_cvx_2x2 SNR=20 lambda=0.5	5,36	11,72	4,92
Rk_cvx_4x4 SNR=20 lambda=0.5	7,78	16,53	7,36

Para el otro modelo de canal las simulaciones realizadas se resumen en la gráfica que se adjunta a continuación. Donde ha de destacarse que la señal a ruido utilizada es de 18 dB.

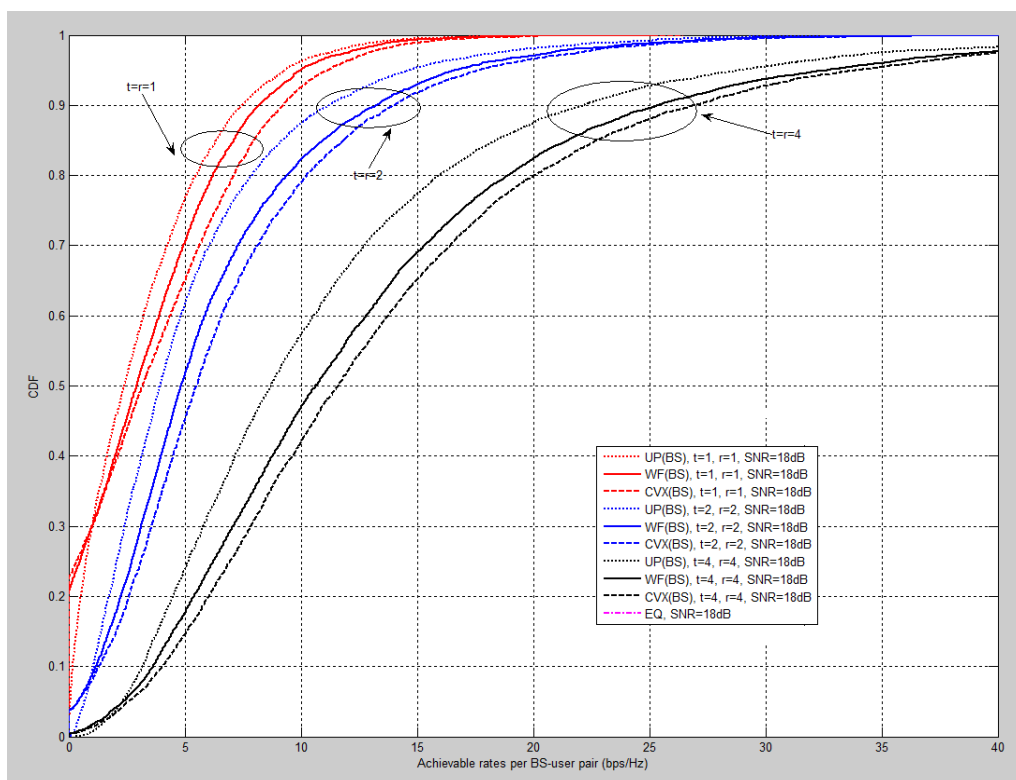


Figura 5.31 CDF algoritmos coordinación estaciones base canal alternativo

Se aprecian resultados muy parecidos, el comportamiento de la gráfica es idéntico, siendo las tasas para la configuración de 4x4 mayores en este canal. Aún así, los valores se puede decir que son comparables.

Además, otra manera de compara los resultados de ambos canales es a través de la tasa por antena. Para el canal SCM se muestran las tres funciones acumuladas, una para cada configuración de antenas.

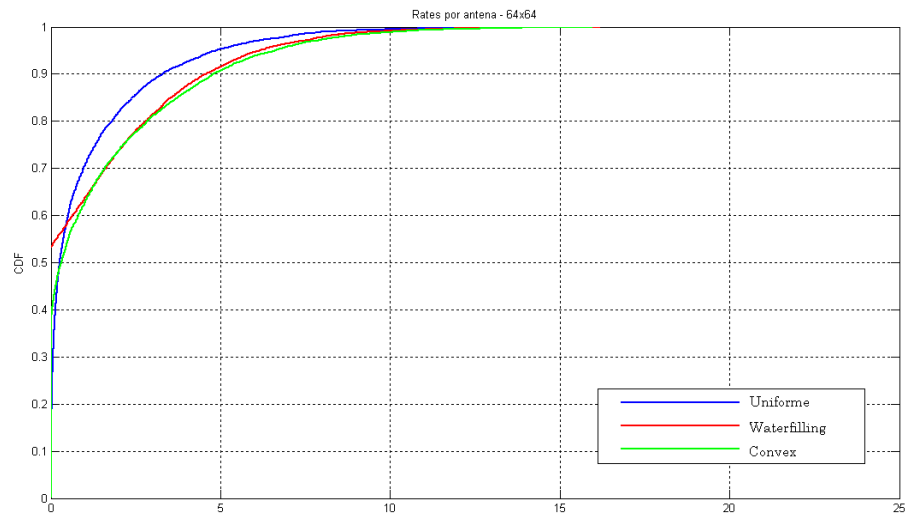


Figura 5.32 CDF 1x1 por antenna para canal SCM

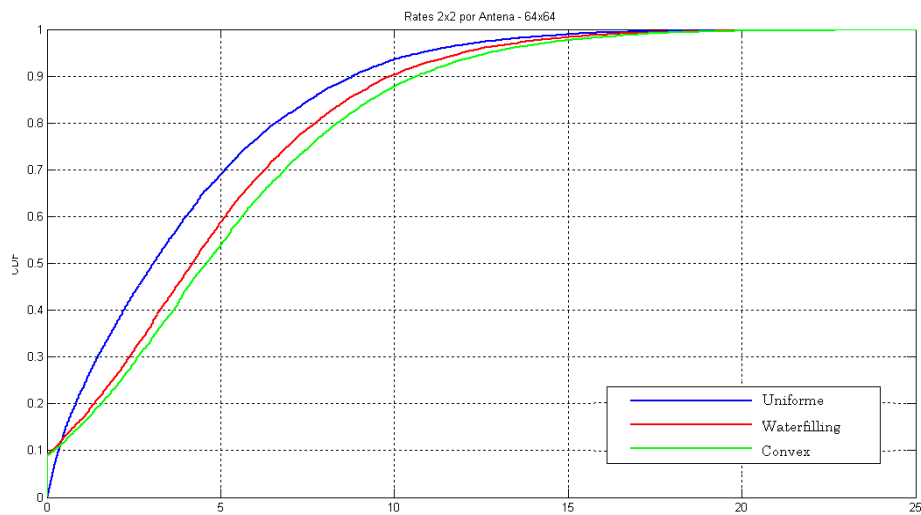


Figura 5.33 CDF 2x2 por antenna para canal SCM

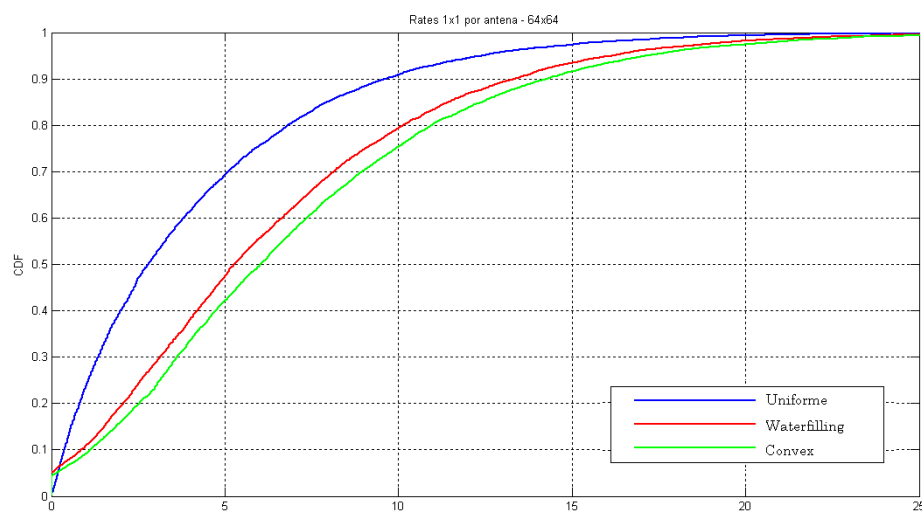


Figura 5.34 CDF 4x4 por antenna para canal SCM

La tónica general, son tasas menores para las tres configuraciones. Ya que lo que está representado es la tasa por antena, por lo tanto, los resultados deben salir así.

Para el otro modelo, la gráfica correspondiente es la siguiente.

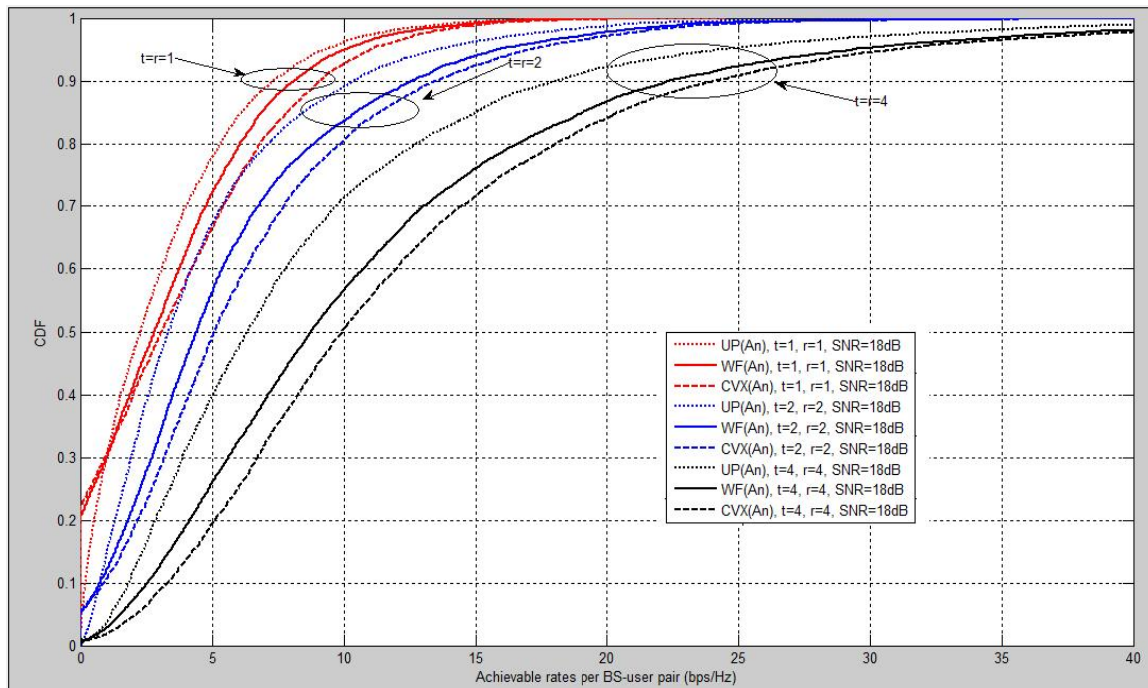


Figura 5.35 CDF por antena otro modelo

Para las tasas por antenas se obtienen resultados similares que en el caso anterior. Salen valores muy parecidos para ambos modelos de canal, pero en el modelo SCM siguen saliendo un poco más pequeños.

De cara a posteriores simulaciones, el SCM tiene la ventaja de poder usar más de una portadora, además de poder jugar con los parámetros de las antenas.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

6. Conclusiones

La conclusión final después de haber analizado los resultados obtenidos en este proyecto, es que el canal SCM tiene un comportamiento en cuanto a tasa de transmisión muy similar al modelo de canal con el que se ha comparado.

Destacando las ventajas de poder utilizar varias portadoras, poder controlar varios parámetros de las antenas y además, en la versión posterior SCME, incluye control de interferencias entre las estaciones base.

En cuantos a los parámetros analizados, el comportamiento es el esperado a priori. Primero se ha analizado el tamaño del escenario y los resultados coherentes. En cuanto al número de antenas utilizado en cada elemento de la transmisión, si vamos aumentado dicho número, se incrementa la tasa por estación base.

Por parte de la potencia los resultados cercioran que conforme se aumenta la potencia transmitida, las tasas mejoran. Esto es equivalente a haber variado la relación señal a ruido del sistema.

Unos de los últimos parámetros analizados ha sido la dependencia de la separación de las antenas con la tasa de transmisión. Realmente se analiza la dependencia de la separación entre antenas con la correlación. Los resultados obtenidos son los esperados mostrados en la tabla donde se describe la dependencia de la correlación con la separación de antenas.

Por último se vio las diferencias con el otro modelo de canal, comentado ya en ente apartado de conclusiones.

Como conclusión final, este modelo de canal es un modelo idóneo para realizar simulaciones e intentar mejorar los algoritmos de coordinación de estaciones base. Además está preparado para simular e investigar el nuevo protocolo de comunicaciones móviles LTE, aún por determinar 100%.

Se observa que en todas las simulaciones las tasas alcanzadas tanto por el algoritmo waterfilling como por el convex, son bastantes elevadas. Es decir, gracias a la coordinación entre estaciones base, se consigue una reducción de interferencias y con ello una mejora en la tasa por usuario.

Además notar la diferencia que hay entre estos dos algoritmos y el uniforme es considerable, notando como hemos comentado la cancelación de



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

interferencias. Es de resaltar también, que los resultados del waterfilling son muy similares a los obtenidos con la optimización convex, por lo que la aproximación a la solución necesaria se puede considerar muy buena.

7. Trabajos futuros

Para seguir con la tónica de este proyecto, se podría realizar simulaciones modificando los parámetros de las antenas, ya que en este proyecto lo único que se ha hecho es modificar la separación entre ellas.

Una posibilidad es ver el comportamiento de antenas más direccionales y jugar con sus orientaciones. Así se podría comprobar el comportamiento de los algoritmos de coordinación de estaciones base ante este parámetro.

Otra vía de continuación, es analizar el nuevo modelo de canal SCM, el SCME. Este está preparado para utilizar frecuencias mayores a 2 GHz y además incorpora control de interferencias entre las estaciones base.

Además, todo el proyecto está basado en un sistema con un usuario por celda. El waterfilling modificado está preparado para coordinar un sistema MIMO multiusuario, por lo tanto, asignar varios usuarios por celda sería otra mejora que explicarían mucho mejor el comportamiento de los diferentes algoritmos de coordinación.



A. Pliego de condiciones

A continuación se aclara el software y las herramientas utilizadas para la realización de este proyecto y por lo tanto, necesarias para poder llevar a cabo cualquier ampliación futura.

Principalmente el software utilizado es matlab, con el se ha realizado el código necesario para realizar las diferentes simulaciones y se ha adaptado para realizarlo de una manera óptima.

Conforme aumenta el número de antenas, tanto la generación de las matrices de canales como el cálculo de las tasas de transmisión, es cada vez más pesado. Además, hay que realizar un número elevado de iteraciones para poder afirmar los resultados. Por ello se aconseja utilizar algún equipo de alta capacidad o un sistema que pueda paralelizar las simulaciones.



B. Presupuesto

El desarrollo de este proyecto se inició en Junio de 2009 y termina en Junio de 2010, prolongándose por lo tanto en 12 meses. El trabajo se ha producido de forma continua, sobretodo horas dedicadas por la tarde, habiendo una pausa de un mes en el verano de 2009. El trabajo realizado se puede dividir en diferentes fases.

- 1) Fase toma de contacto: en esta parte sobretodo se ha realizado la lectura de documentación relacionada con el tema a tratar. Empezando con temas genéricos y entrando en detalle posteriormente. Adquiriendo conocimientos acerca del protocolo LTE, comunicaciones MIMO y más a fondo en el modelo de canal SCM.
- 2) Comprobaciones previas: aquí se ha dedicado horas a entender el código a utilizar y adaptarlo al uso en concreto que se le quería dar. Realizando ciertas comprobaciones para dejar todo preparado para realizar las diferentes simulaciones.
- 3) Realización de las simulaciones: una vez estando todo listo, se realizan las diferentes simulaciones para obtener los resultados del proyecto.
- 4) Redacción de la memoria: los tres pasos realizados anteriormente se plasman en el documento en el que nos encontramos.

En resumen, el total de semanas empleadas han sido de 50, dedicando unas 15 horas a la semana. Esto hace un total de 750 horas de trabajo.

Además la tutora de este proyecto ha dedicado aproximadamente unas 25 horas de apoyo y supervisión a lo largo de todo el proyecto. Las tarifas las impone el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones.

El presupuesto final se detalla en la siguiente tabla, donde se incluyen las horas de trabajo calculadas anteriormente, además de los equipos y recursos utilizados.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

Tabla B.1 Presupuesto

	Tiempo	Tarifa	Total (Euros)
Ingeniero técnico	750 h	30 euros/hora	22500
Tutor	25 h	60 euros/hora	1500
Coste de equipos			
Ordenador de gama media		600 euros	600
Local	1 año	100 euros / mes	1200
		IVA 16%	4128
		TOTAL	29928

Por lo tanto el coste del proyecto es de aproximadamente 30000 euros.



C. Glosario de términos y acrónimos

1G

Primera generación de telefonía móvil (1^o Generation)

2G

Segunda generación de telefonía móvil (2nd Generation).

3G

Tercera generación de telefonía móvil (3rd Generation).

4G

Cuarta generación de telefonía móvil (4th Generation).

IMTS

Sistema innovador propuesto por los laboratorios BELL.

BS

Estación base (*Base Station*).

MS

Estación móvil (*Mobile Station*).

AMPS

Nombre de la primera generación de móviles lanzada en EEUU.

LTE

Evolución a largo plazo (*Long Term Evolution*).

FDMA

Técnica de multiplexación basada en la división en frecuencia.

GPRS

Servicio general de paquetes vía radio (*General Packet Radio Service*).

TDMA

Técnica de multiplexación basada en la división en tiempo.

GSM

Sistema global para las comunicaciones móviles (*Global System for Mobile*).

UMTS

Sistema universal de telecomunicaciones móviles (*Universal Mobile Telecommunications System*).



3GPP

Proyecto de sociedad de tercera generación (*3rd Generation Partnership Project*).

SCM

Modelo de canal espacial (*Spatial Model Channel*)

ACIMUT

Ángulo de orientación horizontal de una antena. Su valor está entre 0 y 360°, con origen en la dirección norte y sentido antihorario.

AWGN

Ruido blanco y gaussiano (*Additive White Gaussian Noise*).

CDMA

Acceso múltiple por división de código (*Code Division Multiple Access*).

E-UTRA

Evolución del acceso radio terrestre UMTS (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access*).

HSPA

Descarga de paquetes a alta velocidad (*High-Speed Packet Access*).

HSPA+

Evolución HSPA (*Evolved HSPA*).

LOS

Línea de vista (*Line of Sight*).

MIMO

Múltiple entrada múltiple salida (*Multiple-input Multiple-output*).

MISO

Múltiple entrada única salida (*Multiple-input Single-output*).

NLOS

No línea de vista (*Non line of Sight*).

OFDM

Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

PIRE

Potencia Isotrópica Radiada Equivalente.



Evaluación de técnicas de coordinación de estaciones base en canales SCM

RF

Espectro de radiofrecuencia (*Radio frequency*).

RTD

Modelo de propagación basado en trazado de rayos para microceldas (*Ray Tracing and Diffraction*).

SIMO

Única entrada múltiple salida (*Single-input Multiple-output*).

SISO

Única entrada única salida (*Single-input Single-output*).

SINR

Relación señal a ruido más interferencia (*Signal to Interference plus Noise Ratio*).

SNR

Relación señal a ruido (*Signal to noise ratio*).

W-CDMA

Acceso múltiple por división de código de banda ancha (*Wideband Code Division Multiple Access*).



Bibliografía

- [1] Ezio Biglieri, "MIMO Wireless Communications" Cambridge University Press, 2007. pp. 1-87.
- [2] [Foschini1] G.J.Foschini and M.J.Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas" Lucent Technologies, Bell Labs. Innovations. Wireless Personal Communications, Vol. 6, Issue 3, Marzo 1998, pp. 311-335.
- [3] G.J.Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas" Bell Labs Technology Journal, No2, 1998, pp. 41-59.
- [4] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels". European Transaction on Telecommunications, Vol 10, No 6, Nov/Dec 1999.
- [5] A.G. Armada, M.S. Fernández y R.C. Sánchez., " Waterfilling Schemes for Zero - Forcing Coordinated Base stations Transmisión. Departamento de Teoría de la señal Universidad Carlos III (Madrid).
- [6] G.J.Foschini, K. Karakayali and R.A Valenzuela, "Coordinating multiple antenna cellular network to achieve enormous spectral efficiency" IEEE Wireless Communications, Vol 13, No 4, pp 56-61. Aug, 2006.
- [7] J.G. Andrews et al., "Overcoming Interference in Spatial Multiplexing MIMO Cellular Networks", IEEE Wireless Communications, Vol. 14, No. 6, pp. 95-104, Dec 2007.
- [8] 3GPP TR 25.814 (v7.1.0 2006-09)., "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Layer Aspects for Evolved UTRA"
- [9] O.F.Fernández., "Caracterización experimental y modelo de canal MIMO para aplicaciones WLAN y WM". UC, Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, 2007. Universidad de Cantabria.
- [10] 3GPP TR 25.996 (v8.0. 2008-12)., "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Spatial Channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations"
- [11] Spirent Communications. Inc., "Correlation Based Spatial Channel Model"